

Bétons pour des applications particulières

7.1 Béton de parement	202
7.1.1 Introduction	202
7.1.2 Exigences normatives	202
7.1.3 Technologie du béton	205
7.1.4 Recommandations générales pour la planification du béton de parement	206
7.1.5 Recommandations particulières pour la réalisation du béton de parement	210
7.2 Béton à haute résistance	214
7.2.1 Introduction	214
7.2.2 Exigences normatives	214
7.2.3 Technologie du béton	215
7.2.4 Recommandations pour la planification du béton à haute résistance	217
7.3 Béton fibré à ultra-hautes performances	219
7.3.1 Introduction	219
7.3.2 Exigences normatives	219
7.3.3 Technologie du béton	220
7.3.4 Recommandations pour la planification des bétons fibrés à ultra-hautes performances	223
7.4 Béton pour parois moulées et pieux forés	225
7.4.1 Introduction	225
7.4.2 Exigences normatives	227
7.4.3 Technologie du béton	228
7.4.4 Recommandations pour la réalisation du béton pour pieux forés et parois moulées	229
7.5 Béton pour revêtements routiers	230
7.5.1 Introduction	230
7.5.2 Exigences normatives	231
7.5.3 Technologie du béton	232
7.5.4 Recommandations pour la planification des couches de surface en béton	235

7.1 Béton de parement

7.1.1 Introduction

La teinte, la conception, la planéité et la précision dimensionnelle des surfaces en béton de parement (béton apparent) font l'objet d'exigences spécifiques. Lors de la production d'un béton de parement, une distinction est faite entre les surfaces dont le coffrage sert d'élément architectural et les surfaces subissant un traitement ultérieur. Dans les deux cas, la couleur peut constituer une caractéristique d'expression (voir chapitre 4.4).

La réalisation des surfaces en béton de parement demande non seulement un grand savoir-faire de tous les professionnels impliqués dans le chantier, mais aussi une planification soignée et une exécution impeccable. Pour les ouvrages esthétiquement exigeants, une coordination optimale et une communication directe entre tous les partenaires sont indispensables.

7.1.2 Exigences normatives

Types de coffrage

Le béton de parement doit satisfaire aux exigences de la norme SN EN 206-1. La norme SIA 118/262 définit les exigences relatives à l'aspect de la surface en béton de parement en fonction de 4 types différents de coffrage (type 1 à type 4, fig. 7.1.1).

- type 1: béton d'aspect ordinaire
- type 2: béton d'aspect soigné
- type 3: béton de conservant l'empreinte des lames de coffrage
- type 4: béton de conservant l'empreinte des panneaux de coffrage

Les types de coffrage influencent, indépendamment du traitement ultérieur de la surface, l'apparence caractéristique du béton.

Classes de béton de parement

Les exigences spécifiques au béton de parement sont fournies par le cahier technique n° 2 de cemsuisse «Cahier technique pour les constructions en béton de parement». Les exigences à l'égard de la surface du béton sont décrites à l'aide de 4 classes de béton de parement (SBK 1 à SBK 3 et SBK S). Le type de coffrage 1 n'est admis pour aucune des classes de béton de parement. La classe de béton de parement SBK S demande la spécification du type de coffrage par l'auteur du projet (tab. 7.1.1).

Les exigences esthétiques relatives à la surface en béton de parement augmentent avec la classe de béton de parement. La classe de béton de parement SBK 1 représente la qualité minimale, sans objectif clair d'une volonté d'expression particulière. Dans la plupart des cas, on choisit les classes de béton de parement SBK 2 et SBK 3. La classe de béton SBK S constitue une classe spéciale, «ouverte». Elle permet la spécification de caractéristiques de surface exceptionnelles. Les classes de béton de parement sont définies sur la base de 5 paramètres (texture, bullage, teinte, planéité et joints).

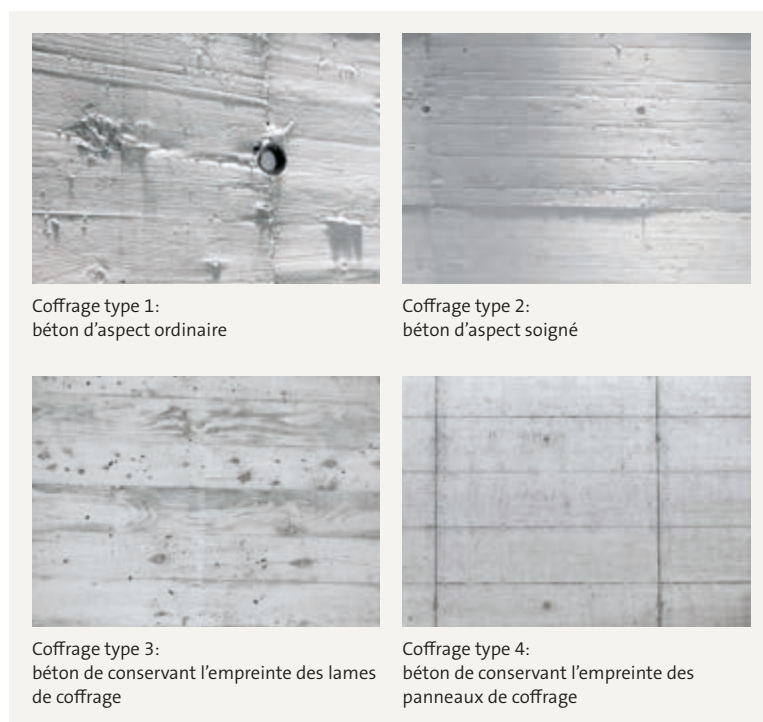


Fig. 7.1.1: Types de coffrage selon la norme SIA 118/262.

Texture (TX)

La texture décrit la structure de la surface du béton et l'exécution des joints entre les éléments. Les exigences sont formulées par rapport à l'homogénéité et l'uniformité de la surface, les bavures de pâte de ciment aux joints (fig. 7.1.2) et l'étendue des décalages, décrochements et redents.

Bullage (LK)

On entend par bullage l'apparition de creux et de pores ouverts à la surface du béton (fig. 7.1.3. Une évaluation qualitative de l'apparence se base sur leur fréquence et leur régularité. Les bulles ayant un diamètre > 15 mm sont inadmissibles pour un béton de parement. Le nombre de creux avec un diamètre moyen compris entre 1 et 15 mm peut être limité, p.ex. sous forme de proportion de surface occupée par les bulles sur une surface test de 500 x 500 mm.

Teinte (FB)

Les critères d'évaluation de la teinte sont le ton de la teinte et sa régularité. Les exigences posées concernent les déviations de couleur et variations de teinte claire-foncée (formation de voiles, fig. 7.1.4).

Joints (FG)

L'exécution des joints de bétonnage et de coffrage est primordiale pour l'apparence générale (fig. 7.1.5). Les exigences se rapportent non seulement à l'exécution, mais aussi à l'étanchéité des joints, ainsi qu'à la protection des arêtes et le décalage entre les étapes de bétonnage.

Planéité (EH)

La planéité de la surface en béton de parement est influencée essentiellement par la planéité et la rigidité du coffrage. Les exigences quantitatives en matière de tolérances sont définies en fonction de la distance de mesure (fig. 7.1.6).

Les exigences des 5 paramètres sont résumées dans les tableaux 7.1.2 à 7.1.5.

Types de coffrage selon norme SIA 118/262	Classe de béton de parement selon cahier technique n° 2 cemsuisse
Type 1: béton d'aspect ordinaire	aucune
Type 2: béton d'aspect soigné	SBK 1
Type 3: béton de parement conservant l'empreinte des lames de coffrage	SBK 2, SBK 3
Type 4: béton de parement conservant l'empreinte des panneaux de coffrage	SBK 2, SBK 3
Spécification du type de coffrage par l'auteur du projet	SBK 5

Tab. 7.1.1: Attribution des types de coffrage aux classes de béton de parement.

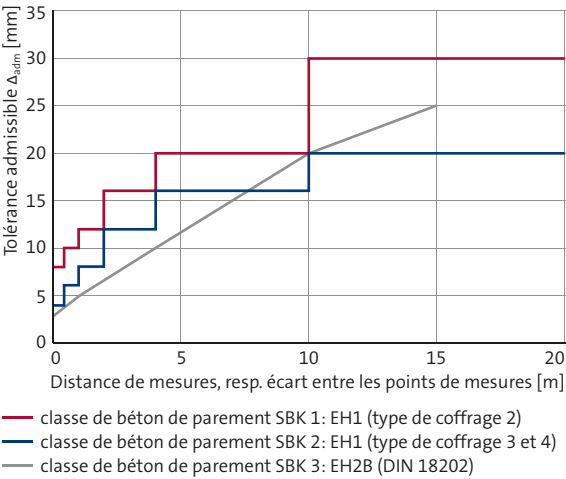


Fig. 7.1.6: Exigences à l'égard de la planéité des surfaces de béton.

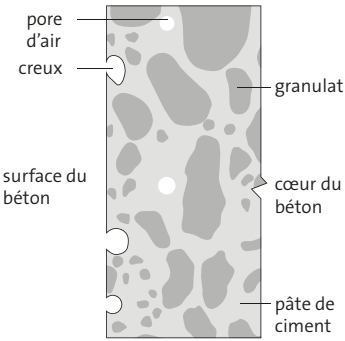


Fig. 7.1.3: Section d'un béton avec des bulles en surface et des pores d'air à l'intérieur du béton.



Fig. 7.1.2: Joint de coffrage non étanche.



Fig. 7.1.4: Variations de teinte claire-foncée (formation de voiles).



Fig. 7.1.5: Joint de bétonnage horizontal camouflé par un faux joint sous forme d'une gorge trapézoïdale.

7. Bétons pour des applications particulières

7.1 Béton de parement

Tab. 7.1.2:
Explication et exigences de la classe de béton de parement SBK 1.

Explication	Qualité minimale sans conception d'un aspect particulier, exemples: parois de caves ou locaux industriels
Texture	<ul style="list-style-type: none"> • surface du béton lisse, fermée et largement uniforme • bavures de pâte de ciment jusqu'à une largeur d'env. 10 mm et une profondeur d'env. 5 mm • décalages, décrochements et redents sont admissibles jusqu'à 5 mm • empreinte de l'élément de coffrage tolérée
Bullage	pas d'exigence concernant la fréquence des creux
Teinte	<ul style="list-style-type: none"> • variations de teinte claire/foncée (formation de voiles) sont admissibles • coulures de rouille et salissures ne sont pas tolérées
Planéité	EH 1 (fig. 7.1.6)
Joints	<ul style="list-style-type: none"> • joints sont étanches et des bavures de mortier fin, apparues lors de la précédente étape de bétonnage, sont éliminées en temps utile • décalage de surface toléré jusqu'à env. 10 mm

Tab. 7.1.3:
Explication et exigences de la classe de béton de parement SBK 2.

Explication	Qualité normale avec une conception d'un aspect spécifié, exemples: cage d'escalier, mur de soutènement
Texture	<ul style="list-style-type: none"> • surface du béton lisse, fermée et largement uniforme • bavures de pâte de ciment ne sont pas tolérées • légers décrochements techniquement inévitables tolérés jusqu'à 3 mm • d'autres exigences relatives aux joints de coffrage et empreintes d'éléments de coffrage sont à fixer en détail
Bullage	le niveau d'exigence quant à la fréquence des creux doit être fixé par l'auteur du projet, p.ex. 0.5 % de la surface test
Teinte	<ul style="list-style-type: none"> • variations régulières et uniformes de la teinte claire/foncée (formation de voiles) sont admissibles • changements de peau de coffrage, du mode de traitement de celle-ci ou de composants du béton, ne sont pas tolérés
Planéité	EH 1 (fig. 7.1.6)
Joints	<ul style="list-style-type: none"> • joints sont étanches et des bavures de mortier fin, apparues lors de la précédente étape de bétonnage, sont éliminées en temps utile • léger décalage des surfaces toléré jusqu'à 5 mm • les arêtes (arêtes vives) doivent être protégées

Tab. 7.1.4:
Explication et exigences de la classe de béton de parement SBK 3.

Explication	Qualité supérieure avec une conception correspondant à une recherche esthétique précise, exemples: façades de bâtiment
Texture	exigences fixées par l'auteur du projet dans le plan de calepinage <ul style="list-style-type: none"> • dimensions et structure des éléments de coffrage • type et disposition des joints • disposition et étanchéité des joints de coffrage • profil, largeur et situation des arêtes • trous d'ancrage: type, situation, obturation
Bullage	niveau d'exigence quant à la fréquence des creux doit être fixé par l'auteur du projet, p.ex. 0.5 % de la surface test
Teinte	<ul style="list-style-type: none"> • grandes zones de variations de teinte engendrées par des composants d'origine et de type différents, par des changements de la peau de coffrage ou du traitement de celle-ci ou par une cure inappropriée, sont inadmissibles • variations minimales de la teinte claire/foncée (formation de voiles) et déviation minimale dans le ton de la teinte sont admissibles • taches de rouille et salissures, couches de déversement du béton bien visibles ainsi que colorations diverses ne sont pas tolérées
Planéité	EH 2A / 2B (fig. 7.1.6)
Joints	exigences fixées par l'auteur du projet (voir plan de calepinage)

Explication	Classe spéciale correspondant à une conception originale de l'aspect, exemples: éléments de construction représentatifs du bâtiment
Texture	tous les critères sont à fixer de manière détaillée par l'auteur du projet
Bullage	
Teinte	
Planéité	
Joints	

Tab. 7.1.5:
Explication et exigences de la classe de béton de parement SBK S.

7.1.3 Technologie du béton

Ciment

Tous les ciments admis par la norme SN EN 206-1 se prêtent à la confection de béton de parement. Néanmoins, l'emploi de certains types de ciment convient plus spécialement en raison de leurs propriétés particulières.

Les ciments Portland composés (p. ex. l'Optimo) améliorent, grâce à leur teneur en schistes calcinés et filler calcaire, le pouvoir de rétention d'eau et réduisent ainsi le risque de ségrégation. La composition favorable de ces ciments diminue en plus le risque d'efflorescences calcaires. Les ciments Portland blancs (p. ex. Albaro) se prêtent tout particulièrement pour les éléments de constructions clairs ou teintés (béton coloré). En comparaison avec le ciment Portland gris, l'emploi du ciment blanc permet d'obtenir des teintes nettes et pures (haute intensité de couleur), notamment dans le cas de béton teinté en noir.

Afin de garantir une haute uniformité de la teinte et pour les constructions des classes de béton de parement SBK 2, SBK 3 et SBK S, le type et la provenance du ciment ne doivent pas être modifiés durant les travaux de bétonnage.

Eau de gâchage

Pour les constructions des classes de béton de parement SBK 3 et SBK S, il est préférable de renoncer à l'emploi de l'eau recyclée pour la confection du béton ou bien son utilisation est à convenir, au préalable, avec le maître de l'ouvrage.

Granulat

La granularité du granulat doit de préférence comporter une teneur en sable suffisamment élevée et correspondre à celle d'un béton pompé. Les farines influent de manière décisive la teinte, le pouvoir de rétention d'eau et la nature de la surface du béton. De ce fait, la teneur en farine pour un béton de parement doit satisfaire au moins les valeurs indicatives figurant au chapitre 1.3.

Dans les cas d'une surface de béton traitée ultérieurement, la forme et la couleur du granulat supérieur à 4 mm influent sur l'aspect de la surface.

Additions

Le béton de parement peut être teinté à l'aide de pigments (voir chapitre 7.1.5). Le dosage dépend de la teinte visée et de l'intensité de la coloration, ainsi que des composants du béton. De ce fait, des essais préliminaires sont absolument à recommander. Selon les circonstances, les pigments peuvent modifier significativement la demande en eau du béton à cause de leur surface spécifique élevée (voir fig. 1.5.3).

Consistance

Le béton de parement peut être produit avec une classe de consistance C3 / F3–F5 autoplaçant, mais le plus souvent on choisit des bétons avec une consistance plastique. La consistance peut influencer sur la teinte et sur le bullage du béton.

Rapport E/C

Pour garantir une teinte uniforme de la surface du béton, il est important de garder le rapport E/C constant pour toutes les livraisons du béton en tenant compte de l'humidité du granulat (voir chapitre 8.1). Le ressuage du béton est absolument à éviter (voir chapitre 8.3).

Malaxage – mise en place – compactage

Pour prévenir des pertes de qualité, entre autres par des ségrégations, des déviations de teintes ou une prise précoce, le respect de valeurs empiriques suivantes s'est avéré particulièrement pertinent:

- durée de malaxage minimale (60 secondes)
- adaptation précise de la production du béton, des temps de transport, de la vitesse de mise en place
- homogénéisation avant le transbordement (au moins 2 minutes dans le camion malaxeur)
- pas d'ajout d'eau ultérieur sur le chantier
- une température du béton frais aussi constante que possible pour toutes les livraisons.

La mise en place dans le coffrage selon les règles de l'art est une condition primordiale pour l'obtention d'une haute qualité de béton de parement. La hauteur de déversement est à réduire de moitié (< 70 cm) par rapport à celle d'un béton normal et l'épaisseur de la couche de déversement se limite à 50–70 cm. En cas de mise en place en plusieurs couches, il faut veiller à plonger l'aiguille

7. Bétons pour des applications particulières

7.1 Béton de parement

vibrante environ 10 à 15 cm dans la couche précédente déjà compactée, afin d'atteindre une bonne interpénétration des deux couches et prévenir l'apparition de zébrures à la surface du béton suite aux différences de teinte des différentes couches de béton (règles du bon compactage, voir chapitre 3.5).

Cure

En principe, les prescriptions de la norme SIA 262 s'appliquent au béton de parement. La cure du béton de parement poursuit principalement les deux objectifs suivants:

- garantie d'une hydratation homogène de la zone de surface du béton pour une bonne régularité de la teinte
- protection de la surface de béton de parement et de l'armature de raccordement vis-à-vis des venues d'eau précoces

En cas d'exécution en plusieurs étapes des éléments de construction en béton de parement, il faut veiller à tenir constante la durée pendant laquelle le béton demeure dans le coffrage. En outre, le décoffrage du béton doit se faire sans interruption et les surfaces décoffrées doivent rester libres (pas d'appui d'éléments de coffrage), afin d'éviter l'apparition de taches.

Pour le béton de parement, les mesures de protection suivantes sont recommandées:

- recouvrement des surfaces de béton décoffrées avec des films plastiques en tant que protection contre



Fig. 7.1.7: Protection de l'armature de raccordement avec un film plastique.

l'évaporation (éviter le contact direct du film avec le béton, prévenir l'effet de cheminée, pas de bandes collantes pour fixer les films)

- maintien de l'humidité (pour éviter des efflorescences), mais sans condensation de l'eau
- protection des arêtes et angles contre des dégâts mécaniques
- ne pas exposer les surfaces de béton de parement directement aux fortes pluies ou ne pas les asperger avec de l'eau
- étude soigneuse de l'évacuation d'eau des surfaces de façade dans les zones exposées aux intempéries et les acrotères
- emballage des armatures en saillie (armature de raccordement) avec une feuille de plastique (fig. 7.1.7) afin d'éviter les coulures de rouille

A moins qu'ils ne soient complètement éliminés par la suite ou n'aient pas d'effet négatif sur des travaux ultérieurs, les produits de cure ne sont pas recommandés pour les joints de bétonnage, les surfaces traitées ultérieurement ou encore pour les surfaces soumises à des exigences particulières quant à leur aspect.

7.1.4 Recommandations générales pour la planification du béton de parement

Peau de coffrage

La peau de coffrage a un effet déterminant sur l'apparence de la surface du béton (fig. 7.1.8). Les types de peau de coffrage se distinguent fondamentalement par leur pouvoir absorbant et la texture de leur surface.

Une peau de coffrage absorbant de l'eau permet l'élimination de l'air occlus et/ou de l'eau en excès dans la zone superficielle du béton et favorise des surfaces sans bulage et avec une teinte foncée uniforme. Une peau de coffrage non absorbante rend la fabrication de surfaces claires et lisses possible, mais peut faciliter l'apparition de creux, de marbrures, voiles et variations de teintes (tab. 7.1.6).



Fig. 7.1.8: Série de surfaces de béton obtenues au moyen de peaux de coffrage différentes.

Type de peau de coffrage	Matériau de peau de coffrage
Absorbant	<ul style="list-style-type: none"> • lames brutes ou rabotées • panneaux agglomérés • panneaux non traités • natte drainante
Non absorbant	<ul style="list-style-type: none"> • panneaux traités • revêtement synthétique • résine synthétique • banches métalliques • matrices

Tab. 7.1.6: Types et matériaux de peau de coffrage.

Agents de démoulage

Les agents de démoulage assurent un décoffrage optimal des surfaces de béton et une reproduction impeccable de la peau de coffrage, sans défaut aux endroits délicats, tels que les arêtes et les angles. Le bon choix et la quantité exacte appliquée du produit de démoulage sont primordiaux pour un aspect uniforme et un faible bullage (respecter les indications des producteurs). Les agents de démoulage servent aussi à conserver et soigner le matériau du coffrage de manière à pouvoir utiliser les éléments de coffrage à plusieurs reprises.

Il existe différents types d'agents de démoulage, tels que les huiles, les cires, les laques et les émulsions. Les agents de démoulage sont formulés avec ou sans solvant. Tandis que les agents de démoulage sans solvant sont prêts à l'emploi dès leur application, les agents de démoulage avec solvant développent leurs propriétés de séparation seulement après que les solvants se soient évanoués. Les temps de ventilation peuvent être allongés notablement en cas de basses températures, d'humidité de l'air élevée ou en cas d'application d'une couche épaisse du produit. Après leur application, les agents de démoulage sont à répartir régulièrement en un deuxième passage avec un racloir ou, encore mieux, avec un chiffon (fig. 7.1.9 et 7.1.10).

Normalement, la quantité nécessaire à appliquer sur une peau de coffrage non absorbante est très faible. Le film d'agent de démoulage doit être aussi uniforme et mince que possible (env. 10 ml/m²). De longues durées d'attente d'un coffrage monté et traité avec l'agent de démoulage sont à éviter. Une application trop épaisse d'un agent de démoulage peut provoquer des colorations jaunes à brunes (fig. 7.1.11) et le bullage de la surface du béton (fig. 7.1.12, voir aussi chapitre 8.1).

En conséquence, il est indispensable d'adapter l'agent de démoulage à la peau de coffrage, au béton et aux conditions d'environnement, en tenant compte des recommandations des producteurs de coffrages et d'agents de démoulage.



Fig. 7.1.9: Application de l'agent de démoulage à l'aide d'un pulvérisateur.



Fig. 7.1.10: Répartition régulière de l'agent de démoulage avec un chiffon.

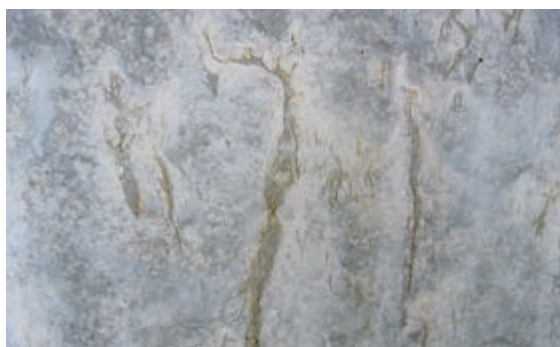


Fig. 7.1.11: Colorations suite à un dosage excessif de l'agent de démoulage.



Fig. 7.1.12: Bullage de la surface suite à un dosage excessif de l'agent de démoulage.

7. Bétons pour des applications particulières

7.1 Béton de parement

Ancrage du coffrage

Le nombre et l'espacement des points d'ancrage dépendent du type de coffrage et de la pression exercée sur le coffrage par le béton frais. L'obturation des trous d'ancrage est importante pour l'aspect d'ensemble de la surface du béton de parement. Dans la pratique, on se sert de bouchons synthétiques ou métalliques. Les deux types de bouchons sont placés, soit affleurant au niveau de la surface, soit un peu en retrait, si p.ex. une image régulière des points d'ancrage doit rester visible. Comme alternative, il est possible de colmater les trous d'ancrage avec un mortier de couleur similaire. Une méthode plus contraignante consiste à confectionner des bouchons avec le même béton de parement (fig. 7.1.13).



Fig. 7.1.13: Types d'obturation des trous d'ancrage.

Joints

Les joints visibles sur la surface du béton de parement se situent aux joints de coffrage ou aux joints de bétonnage et aux faux joints. En cas d'exigences normales, les joints doivent être suffisamment étanches pour ne laisser échapper que très peu de pâte de ciment. Dans des cas particuliers, les joints de coffrages sont étanchés avec des bandes de mousse synthétique ou de caoutchouc cellulaire.

Il est préférable que la disposition et l'exécution des joints de bétonnage et des faux joints soient convenues entre l'auteur du projet et l'entreprise de construction. Un accent optique peut être apporté à un joint de bétonnage au moyen d'une gorge, réalisée à l'aide de baguettes en bois triangulaires ou trapézoïdales (fig. 7.1.14 à gauche et au centre). Lors de la pose de ces baguettes, il faut veiller à respecter une épaisseur d'enrobage suffisante de l'armature. Si aucune gorge n'est prévue, les joints de béton-

nage peuvent être exécutés avec des baguettes rectangulaires fixées sur la face interne du coffrage (fig. 7.1.14 à droite). La baguette est enlevée après le décoffrage de la première étape de bétonnage et l'espace rempli avec le béton de l'étape suivante. La surface de béton montre alors un profil parfaitement plan.

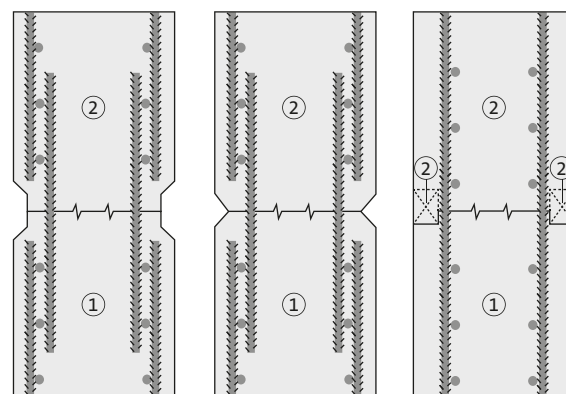


Fig. 7.1.14: Exécution du joint de bétonnage avec une baguette trapézoïdale (à gauche), triangulaire (au centre) et rectangulaire, puis remplissage (à droite).

Arêtes

Les arêtes sont en général chanfreinées à l'aide de profils triangulaires. On spécifie souvent aussi des arêtes vives, c.-à-d. ni chanfreinées ni arrondies comme élément de forme caractéristique. Les arêtes et angles vifs peuvent se casser ultérieurement malgré une exécution méticuleuse. En outre, il faut tenir compte des risques de blessure des passants dans des zones piétonnes et d'endommagement du béton de parement.

Un coffrage rigide, une géométrie exacte de la peau de coffrage et une étanchéité supplémentaire des joints de coffrage sont indispensables pour la réalisation des arêtes vives. Elles doivent ensuite être protégées après le décoffrage. (fig. 7.1.15).

Distanceurs

Les distanceurs assurent l'épaisseur d'enrobage nécessaire de l'armature entre la peau de coffrage et la nappe externe de l'armature. Ils doivent être choisis en fonction de l'élément de construction. La surface d'appui sur le coffrage doit être aussi petite que possible. Afin d'éviter l'apparition des distanceurs à la surface, il est préférable d'utiliser des éléments constitués du même matériau que le béton. Les distanceurs à base de ciment doivent être saturés en eau immédiatement avant la fermeture du coffrage et le bétonnage. Les distanceurs en matière synthétique ne sont pas recommandés pour le béton de parement.



Fig. 7.1.15: Protection des arêtes vives décoffrées d'un élément mural. (Source: Konzett Bronzini Gartmann AG, Chur).

Conditions climatiques

Les conditions climatiques pendant la durée du chantier et de service influencent l'apparence du béton. Des conditions d'environnement défavorables, pendant la phase d'assèchement du béton jeune (p.ex. de trop grandes différences de température diurne et nocturne, fortes variations de l'humidité de l'air, condensation matinale, givre), influent fortement sur l'aspect optique des surfaces de béton de parement même si des efforts considérables au niveau des études et de l'exécution ont été entrepris. La réalisation de constructions en béton de parement sous des conditions hivernales peut notamment provoquer, à cause des basses températures, l'apparition de colorations claires-foncées et des efflorescences (voir chapitre 8.3).

Pendant la durée de service, il faut soigneusement étudier l'évacuation de l'eau de pluie des surfaces en béton de parement exposées directement aux intempéries, afin de restreindre au maximum les salissures et la couverture végétale ou microbiologique, afin de garantir à long terme une apparence uniforme. Les facteurs d'influence de l'évacuation de l'eau et l'apparition de salissures sont:

- l'orientation de la surface (exposée ou protégée des intempéries, ensoleillement, vent, hauteur de l'élément de construction)
- l'inclinaison de la surface (verticale, inclinée vers l'intérieur ou vers l'extérieur)
- la texture (nature rugueuse ou lisse de la surface)
- le pouvoir d'absorption d'eau du béton (porosité)

Surface test

Les surfaces test doivent être représentatives de la géométrie typique des éléments de construction, de l'enrobage, de la densité et de la répartition de l'armature, des éléments incorporés, de la méthode de mise en place et de la composition prévue du béton. Les surfaces test sont réalisées en poursuivant les buts suivants:

- l'exécution des surfaces de béton dans les conditions cadre de l'ouvrage et du chantier
- la définition et l'optimisation des efforts nécessaires, de l'instruction et de la formation du personnel
- la représentation pratique de tous les détails d'exécution, entre autres la teinte, la texture, etc.
- la définition de l'apparence à convenir contractuellement avec le maître d'ouvrage

La réalisation des surfaces test est, selon le cahier technique pour les constructions en béton de parement, hautement recommandée pour la classe de béton de parement SBK 2, mais surtout pour la classe de béton de parement SBK 3. Pour la classe de béton de parement SBK 5, les surfaces test ne seront exécutées que sur demande de l'auteur du projet. La classe de béton de parement SBK 1 ne demande pas de surfaces test. En règle générale, on exploite pour les essais de bétonnage les éléments de construction d'importance moindre comme les parois de cave ou sans exigence de béton de parement.

Evaluation

Les critères d'évaluation du béton de parement se basent sur la spécification des surfaces de béton de parement dans la soumission. Les aspects suivants sont à considérer lors de l'évaluation:

- un délai suffisamment long entre le décoffrage et le moment de l'inspection visuelle, puisque l'apparence de la surface du béton jeune peut encore changer
- les surfaces ne sont pas reproductibles sans aucune tolérance, puisque les variations naturelles au niveau des composants, la dispersion admise de la composition du béton et les effets convergents de la peau de coffrage, de l'agent de démoulage et des conditions météorologiques ne permettent pas des résultats de bétonnage parfaitement identiques
- les différences et irrégularités minimales de la texture et de la teinte sont inévitables (météo, changement de personnel, retards lors de la mise en œuvre, contributions de tiers, etc.).

L'impression générale prime sur les détails de l'aspect lors de l'évaluation. La mise en pratique d'une évaluation doit respecter les points suivants:

- une distance d'observation habituelle des personnes fréquentant l'ouvrage ou l'élément d'ouvrage
- les caractéristiques essentielles de l'ouvrage sont englobées (surfaces représentatives)
- les caractéristiques conceptionnelles sont reconnaissables
- des conditions normales de lumière du jour et d'éclairage
- l'âge de la surface à évaluer (au moins 28 jours entre le décoffrage et l'évaluation à cause des changements de teinte de la surface du béton de parement).

7. Bétons pour des applications particulières

7.1 Béton de parement

7.1.5 Recommandations particulières pour la réalisation du béton de parement

Conception des surfaces

Les surfaces peuvent être conçues non seulement par le choix de la peau de coffrage et la disposition des joints et points d'ancrages, mais aussi par d'autres moyens :

- les matrices
- le traitement de surface
- le photobéton
- le béton coloré

Matrices

Un effet particulier architectonique est obtenu à l'aide des matrices individuellement structurées (fig. 7.1.16), insérées au coffrage. Les possibilités de création vont d'une surface avec imitation de lames brutes jusqu'aux images produites sur la surface par des effets d'ombres et de lumières.

Traitement de surface

Lors du traitement des surfaces avec de l'eau, des produits chimiques ou des moyens mécaniques, il faut veiller à conserver l'enrobage d'armature exigé (tab. 7.1.7 et 7.1.8).

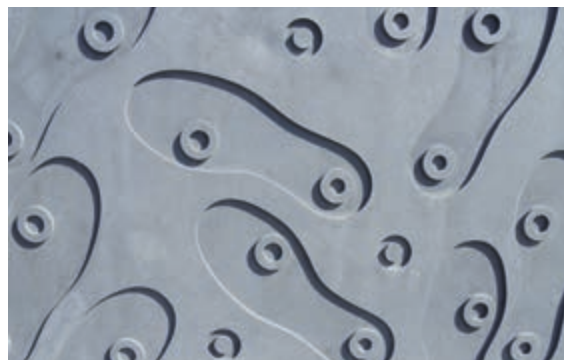


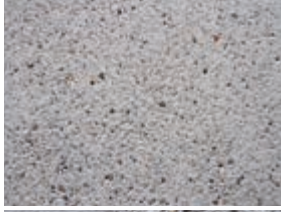



Fig. 7.1.16: Conception de surfaces structurées à l'aide de matrices, relief (en haut), ornement (en bas).

Tab. 7.1.7:
Procédés de traitement des surfaces de béton avec de l'eau et des produits chimiques.




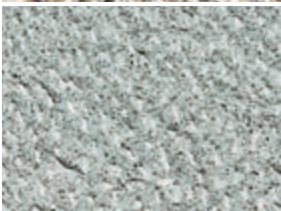
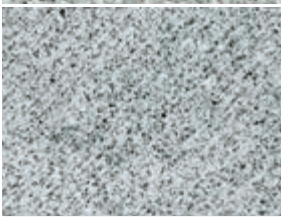
Procédé	Description	
Lavage fin	La pâte de ciment de la surface du béton jeune est enlevée jusqu'à une profondeur de 1 à 2 mm, ce qui confère à la surface un aspect de grès. La teinte est influencée par la pâte de ciment et le granulats selon la profondeur du lavage.	
Lavage grossier	Mise à jour presque de la moitié du granulats grossier, c.-à-d. à une profondeur de plus de 2 mm. Il en résulte une surface grossière, désignée béton lavé. Cette surface est obtenue à l'aide de retardateurs spéciaux, sous forme de pâte étalée sur la surface du béton, suivi de l'élimination de la couche retardée par jet d'eau. La forme et la couleur du granulats sont dominants.	
Attaque à l'acide	La dissolution à l'acide de la peau de ciment en surface du béton durci met légèrement en évidence le granulats. La surface peut paraître un peu rêche, selon la profondeur de l'attaque et la sensibilité aux acides du granulats.	
Jet d'eau sous pression	Le traitement de la surface du béton au jet d'eau se fait comme pour le lavage fin sans retardateur. Jet d'eau basse pression: 20–70 MPa (200–700 bar) Jet d'eau haute pression: 70–170 MPa (700–1700 bar) Jet d'eau très haute pression: > 1700 MPa (> 1700 bar) En fonction de l'intensité du traitement au jet d'eau, des surfaces plus ou moins rugueuses apparaissent.	

Photobéton

Le photobéton est une forme particulière de béton de parement. Les techniques spéciales (procédé photolithique, technique de fraisage assistée par ordinateur/ vectogramme) permettent une empreinte durable de photographies ou autres motifs en surface du béton.

Le procédé photolithique consiste à transformer la photographie, qui sera transposée sur la surface du béton, en un modèle noir et blanc qui sera imprimé par sérigraphie sur un film synthétique d’une épaisseur millimétrique. Au lieu d’utiliser des couleurs, un produit retardateur est appliqué en couches d’épaisseur variable. Cette pellicule est insérée dans le coffrage. Le retardateur conduit à une prise plus ou moins rapide à différents endroits. Après 16 à 24 heures, l’élément en béton peut être décoffré et lavé sous une faible pression d’eau. Il en résulte des variations entre teintes claires et foncées en fonction des zones lisses et rugueuses.

Le vectogramme est une technique de gravure permettant de reproduire les informations provenant d’une image par le fraisage assisté par ordinateur d’un modèle. Celui-ci servira de base pour fabriquer un moule pour l’élément de photobéton. Avec cette technique, il est possible de reproduire des images de taille illimitée. Après le décoffrage, le béton observé de près présente une structure en arêtes, créant un jeu d’ombres et de lumières, qui fait apparaître l’image à partir d’une certaine distance d’observation.

Procédé	Description	
Sablage	Le traitement par sablage conduit à une surface similaire à celle du lavage fin, mais ici le granulat est rendu rugueux et perd son éclat. La surface paraît mate et rugueuse. La profondeur du traitement varie selon la demande.	
Ponçage	Tant que la surface n’est que poncée légèrement, de manière à ce que le granulat devienne à peine visible, la teinte de la pâte de ciment est dominante. La couleur du granulat domine lorsque le ponçage fait bien apparaître celui-ci. Dans les deux cas, la surface est très lisse et brillante. Un polissage supplémentaire renforce nettement l’éclat de la surface.	
Bouchardage	La surface du béton est travaillée grossièrement à la boucharde, ce qui lui confère un aspect rugueux de pierre naturelle.	
Brochage et bosselage	Traitement à la broche de la surface du béton destiné à la rendre fortement rugueuse en fonction des cassures par éclatements. La surface bosselée est traitée grossièrement au têtou ou à la chasse, formant des creux et des bosses.	
Finition au réparoir	Surface du béton traitée coup après coup au moyen d’un charri (ciseau à lame large). La pâte de ciment et le granulat déterminent la coloration.	

Tab. 7.1.8:
Procédés de traitement mécanique des surfaces de béton.

7. Bétons pour des applications particulières

7.1 Béton de parement

Béton coloré

Normalement, le béton coloré est confectionné avec du ciment blanc, coloré à l'aide de pigments (fig. 7.1.17 et 7.1.18). La coloration peut être soutenue par l'emploi d'un granulat coloré, mis à jour par un traitement ultérieur de la surface du béton. Les bétons fabriqués avec des ciments gris peuvent également être colorés, mais l'effet sera moins pur et lumineux. L'intensité de la coloration dépend du dosage et de la qualité des pigments. Pour obtenir la coloration la plus intense possible, il faut doser les pigments jusqu'à saturation (teneur en pigments de l'ordre de 6 à 10 % en masse de la teneur en ciment).

Les pigments sont ajoutés sous forme de granulés, de poudre ou de liquide. Un traitement hydrofuge des surfaces de béton coloré est recommandé.

Fig. 7.1.17:
Béton coloré à base
de ciment blanc
et avec différents
pigments.



Fig. 7.1.18:
Caserne des pom-
piers construit avec
un BAP coloré en
rouge.



Protection de surface

La surface du béton de parement peut être protégée des influences de l'environnement (p. ex. intempéries) et des endommagements (p. ex. graffitis) par divers systèmes de protection. Les systèmes de protection de surface courants sont dans la pratique, entre autres, le traitement hydrofuge, l'imprégnation transparente et le glacis, le système anti-graffiti.

Traitement hydrofuge

Le traitement hydrofuge est une imprégnation de la surface du béton destinée à réduire l'absorption de l'eau et des sels dissous par le béton et le transport de la solution interstitielle des pores chargée en minéraux dissous (hydroxydes de calcium) en surface du béton. La résistance à la diffusion de la vapeur reste quasi inchangée.

Les produits hydrofuges pour béton se composent de silanes et de siloxanes, qui pénètrent de quelques millimètres dans les pores du béton, sans les remplir ni former un film à la surface. De ce fait l'aspect de la surface n'est pas modifié. Normalement il n'y a pas de changement de couleur significatif, mais l'éclat et la clarté du substrat peuvent être légèrement affectés.

Afin de restreindre les efflorescences, une imprégnation hydrofuge est recommandée pour les bétons colorés, notamment les bétons de couleur foncée exposés aux intempéries. Les essais préliminaires sur une surface test sont à prévoir. Le béton jeune ne peut être imprégné qu'à un âge supérieur à 28 jours.

Imprégnations transparentes et glacis

Les imprégnations transparentes et les glacis font également partie des systèmes de protection de la surface du béton. Au contraire du traitement hydrofuge, il se forme un film discontinu à la surface, et les pores ouverts sont partiellement à complètement remplis. L'épaisseur de la pellicule varie, selon la quantité appliquée, entre 10 µm et 100 µm. Il ne se forme pas de couche continue comme dans le cas d'un revêtement. La protection vis-à-vis de l'eau et des gaz est plus forte et plus durable que celle d'un traitement hydrofuge. Les efflorescences, l'érosion due à l'altération et des couvertures biogéniques de la surface du béton (algues, lichens, mousses, etc.) sont en grande partie éliminées.

Une imprégnation transparente se compose de dispersion à base d'acrylates incolores, applicables en plusieurs couches. Une fois durcie à la surface, elle apparaît comme un film transparent satiné mat. La teinte du substrat se trouve légèrement éclaircie.

Pour obtenir un glacis, on ajoute à l'imprégnation transparente entre 2 et 8 % de pigments. La surface du béton est colorée selon le degré de pigmentation du glacis. Il est recommandé de procéder à l'application d'une première couche sans pigment, afin d'éviter des accumulations ponctuelles de pigment.

Une surface test est à prévoir pour les systèmes de protection. Le béton jeune ne peut pas recevoir une imprégnation transparente ou un glacis avant l'âge de 28 jours.

Protection anti-graffiti

Les graffitis sont des images peintes avec des sprays sur des surfaces de béton. Peints illégalement, ils représentent un endommagement conséquent des façades de bâtiments. A cause de leur composition, ils ne sont pas aisément recouvrables par d'autres peintures. Ceci désavantage, tout particulièrement, les bétons de parement. On distingue les systèmes sacrificiels des systèmes non sacrificiels.

- Les systèmes sacrificiels sont constitués de revêtements, p. ex. à base de cires, permettant un nettoyage facile, par l'élimination de la couche sacrificielle qui devra être remplacée.
- Les systèmes non sacrificiels permanents restent en surface du béton malgré le nettoyage et conservent leur fonctionnalité. Ces systèmes se composent d'imprégnations à base de silanes, siloxanes ou polyuréthanes.

Les systèmes anti-graffiti modifient en général les propriétés de la surface du béton de parement (fig 7.1.19). Les effets sur la texture de la surface, la couleur, l'éclat, l'absorption et la résorption d'eau dépendent du substrat du béton et du produit antigraffiti. Il est hautement recommandé de procéder à des essais préliminaires sur des surfaces test et de visiter des ouvrages de référence.



Fig. 7.1.19:
Le système anti-graffiti dans la partie inférieure du parement influence la teinte de la surface du béton.

Cosmétique du béton

Malgré les plus grands soins apportés à la réalisation des constructions en béton de parement, des déviations de la qualité visée peuvent se produire. Les défauts sont souvent éliminés, p. ex. par un nettoyage, un ponçage, un badiageonnage, un enduit, des mastics ou glacis afin de réduire les irrégularités de teinte et de texture.

En principe, des essais préliminaires sur des surfaces test sont recommandés. Les zones de réparation peuvent parfois rester visibles, malgré la plus grande habileté de l'artisan applicateur. De ce fait, il est important d'évaluer si des mesures cosmétiques apportent réellement l'effet désiré.

7.2 Béton à haute résistance

7.2.1 Introduction

Les bétons à haute résistance sont souvent employés pour les piliers élancés dans le bâtiment et les constructions industrielles. La sélection d'un ciment et des additions adéquates, d'un granulats de haute qualité ainsi que l'optimisation générale de la structure du béton et le choix d'un rapport E/C très bas, entre environ 0.25 et 0.40, permettent d'obtenir de hautes résistances à la compression entre 80 et 130 N/mm². La structure du béton très dense, grâce au volume de pores capillaires très faible, conduit à ces hautes résistances à la compression. Des fluidifiants efficaces garantissent, même avec de très faibles teneurs en eau, une bonne ouvrabilité. Les avantages du béton à haute résistance résident dans :

- leur haute résistance à la compression
- les dimensions géométriques fortement réduites des éléments de construction
- la réduction du taux d'armature des éléments comprimés

En Suisse, le béton à haute résistance, avant tout utilisé dans la préfabrication, permet de réduire nettement les dimensions des éléments de construction et, par conséquent, les coûts de transport des colonnes, des éléments de mur et des poteaux (fig. 7.2.1). La densité accrue de ce béton et donc sa résistance plus élevée aux attaques chimiques et aux sollicitations mécaniques est avantageusement exploitée pour la construction de ponts, des ouvrages de protection et des centrales électriques (fig. 7.2.2). Parfois, on emploie le béton à haute résistance

prêt à l'emploi pour la confection sur le chantier du béton de piliers ou pour des tabliers précontraints en vue d'une réduction de la section des éléments de construction.

7.2.2 Exigences normatives

Spécification

Les bétons à haute résistance sont réglementés par la norme SN EN 206-1. On distingue, pour le béton à haute résistance, des classes de résistance allant de C55/67 jusqu'à C100/115 et, pour le béton léger à haute résistance, des classes de résistance LC55/60 à LC80/88. Dans le tableau 7.2.1 ne figurent que les bétons à haute résistance de masse volumique normale, étant donné que les bétons légers à haute résistance ne sont généralement

Classe de résistance	Résistance caractéristique minimale sur cylindres [N/mm ²]	Résistance caractéristique minimale sur cubes [N/mm ²]
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tab. 7.2.1: Classes de résistance à la compression des bétons à haute résistance selon la norme SN EN 206-1.



Fig. 7.2.1: Colonnes ovales pour bâtiment, classe de résistance C80/95.



Fig. 7.2.2: Eléments de ponts, classe de résistance C80/95.

pas fabriqués en Suisse. Les explications suivantes se réfèrent donc uniquement aux bétons à haute résistance de masse volumique normale.

Contrôle de conformité

La norme SN EN 206-1 contient, dans son annexe informative H, des «dispositions supplémentaires relatives aux bétons à haute résistance». Elle fournit des indications quant à la surveillance adéquate des composants, des équipements et des procédures de production. Les mêmes règles de surveillance et de contrôle que pour les bétons de résistance normale s'appliquent. Par contre, la constitution de familles de béton n'est pas admise (voir chapitre 2.2.2).

7.2.3 Technologie du béton

Ciment

Parmi les ciments admis par la norme, ceux de la classe de résistance 52,5 N et R sont majoritairement utilisés pour le béton à haute résistance. Les teneurs en ciment se situent généralement entre 380 kg/m³ et 450 kg/m³ pour les bétons vibrés avec un diamètre maximal du granulats de 16 mm. A cause du faible dosage en eau, une partie significative du ciment ne s'hydrate pas et constitue un filler chimiquement réactif dans le béton.

Eau de gâchage

L'utilisation de l'eau recyclée pour la confection du béton à haute résistance n'est pas recommandée, puisque les matières solides et les résidus des adjuvants peuvent influencer la demande en eau et donc la consistance. Si l'eau recyclée n'a pas de densité significativement accrue et variable, il est possible que son emploi reste sans effet négatif.

Granulat

Habituellement, le béton de résistance normale montre en compression une rupture sous l'effet de la traction transversale le long de la zone de contact entre le granulats et la pâte de ciment ou au sein de la pâte de ciment. Dans le cas du béton à haute résistance, celle-ci est renforcée grâce à la densification de cette zone de contact entre le granulats et la pâte de ciment, par un rapport E/C bas et une faible porosité capillaire (voir chapitre 2.1.3). Ceci vaut autant pour le granulats rond que le granulats concassé et se manifeste dans les surfaces de rupture des bétons à haute résistance. La rupture ne suit pas la zone de contact, mais fracture le granulats (fig. 7.2.3).

La demande en eau d'un granulats dépend essentiellement du sable. Pour assurer le dosage en eau restreint du béton à haute résistance, le sable présentera de préférence une granularité continue et une faible teneur en fines, ainsi qu'une haute régularité. Il vaut mieux renoncer à l'emploi d'un sable concassé. La teneur en éléments impropres du granulats doit être limitée à 3 % en masse.



Fig. 7.2.3: Surface de rupture du béton à résistance normale (en haut) et du béton à haute résistance (en bas).

Pour les classes de résistance supérieure à C80/95, l'emploi de granulats de roche dure est recommandé pour les classes granulaires 4 mm. Il s'agit des calcaires siliceux, des grès siliceux, des calcaires micritiques, des roches cristallines finement grenues et certaines roches vertes. Le diamètre maximal du granulats est, en règle générale, limité à 16 mm (pour les gravillons concassés à 22 mm). En cas de forts taux d'armature, le diamètre maximal du granulats peut être réduit à 8 mm et pour le granulats concassé à 11 mm.

Adjuvants

Pour assurer une bonne ouvrabilité malgré la faible teneur en eau, on fait appel à des fluidifiants à haute performance, p.ex. aux polycarboxylates. Dans la préfabrication des bétons à haute résistance, ces fluidifiants ont en plus un effet accélérateur afin de rendre possible un décoffrage rapide et un traitement de surface (lissage des surfaces non coffrées).

7. Bétons pour des applications particulières

7.2 Béton à haute résistance

Additions

Les additions inertes ne se prêtent pas à la confection de béton à haute résistance, en raison de leur forte demande en eau. Parmi les additions réactives, on se sert surtout de la fumée de silice et de la cendre volante. A partir d'une classe de résistance C70/85, la fumée de silice est additionnée au béton à haute résistance. Elle densifie la microstructure de la pâte de ciment, notamment la zone de contact entre le granulat et la pâte de ciment (voir chapitre 2.1.3). Le dosage de la fumée de silice, sous forme de poudre, présente des inconvénients à cause de sa finesse et sa tendance à former des agglomérats sensibles à la RAG (voir chapitre 6.4). De ce fait, il est préférable d'utiliser un ciment composé contenant de la fumée de silice (p. ex. Fortico 5R). La mouture conjointe de la fumée de silice et du clinker assure un dosage régulier, une distribution homogène et une dispersion efficace de la fumée de silice.

La cendre volante peut se substituer avantageusement au ciment à cause de sa faible demande en eau pour les bétons autoplaçants à haute résistance. L'emploi des cendres volantes est aussi judicieux pour la production de bétons à haute résistance et à faible chaleur d'hydratation.

Production

Puisque le sable contient le plus d'humidité, sa teneur en eau doit être surveillée exactement et prise en compte avec celle des gravillons pour le dosage de l'eau de gâchage. A cause des faibles teneurs en eau et des temps de dispersion plus longs des adjuvants, une durée de malaxage légèrement allongée est recommandée, c.-à-d. selon l'intensité du malaxage, au moins 90 secondes, celle du béton autoplaçant sera au moins de 120 secondes.

Consistance – transport – mise en place

Le béton à haute résistance est normalement produit dans les centrales à béton avec une consistance ferme à plastique, de la classe de consistance C3, et présente un comportement nettement plus thixotrope que le béton à résistance normale. Il nécessite, ainsi, de plus grands efforts pour la mise en place, la répartition et le compactage (durée de compactage doublée). S'il faut pomper le béton à haute résistance, notamment un béton riche en granulat concassé, la puissance de pompage se trouve sensiblement réduite. Le cas échéant, la capacité de pompage peut être diminuée de moitié. D'habitude, le béton à haute résistance pour la préfabrication est confectionné en tant que béton autoplaçant, afin de minimiser les efforts de mise en place et de compactage.

Le béton à haute résistance doit être transporté dans des camions malaxeurs. Ces derniers seront contrôlés avant leur chargement afin d'éviter un mélange avec des restes d'eau de lavage. Le béton à haute résistance sera malaxé encore une fois pendant au moins 2 minutes avant son déchargement sur le chantier.

Cure

Indépendamment des classes d'exposition, le choix de la classe de cure NBK 3 s'impose au minimum pour le béton à haute résistance. Les mesures de protection doivent commencer immédiatement après la finition de la surface, puisqu'il existe un risque accru de perte d'eau excessive dans la zone de surface de ce béton à très faible teneur en eau. Les éléments de construction de grande superficie peuvent être protégés contre la dessiccation à l'aide d'un géotextile humide, lui-même recouvert d'un film plastique. Les éléments massifs doivent être protégés à la fois contre une dessiccation et un refroidissement trop brusque, afin de limiter le risque de fissuration résultant de contraintes thermiques (fig. 7.2.4). La protection par les films plastiques sera complétée par des nattes isolantes. Le béton des éléments coffrés sera protégé par le coffrage.



Fig. 7.2.4: Béton à haute résistance de la classe de résistance à la compression C80/95. Blocs massifs en béton protégés par des nattes isolantes pendant la durée de cure (en haut) et déballés avant leur emploi comme rochers artificiels pour tester des filets de protection contre les chutes de pierres (en bas).

7.2.4 Recommandations pour la planification du béton à haute résistance

Dimensionnement

La norme SIA 262 définit les bases de dimensionnement des constructions en béton qui s’appliquent également au béton à haute résistance. Le béton à haute résistance possède non seulement une haute résistance à la compression, mais aussi une résistance à la traction et un module

d’élasticité plus élevés. Les valeurs indicatives sont données par la norme SN EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Le tableau 7.2.2 résume les valeurs les plus importantes.

Les valeurs de calcul du module d’élasticité indiquées au tableau 7.2.2 valent pour les bétons à haute résistance confectionnés avec des granulats alluviaux. Ces valeurs seront à adapter en fonction du granulat employé.

La fig. 7.2.5 illustre schématiquement le dimensionnement d’une pile en béton à haute résistance et en béton à résistance normale. Le béton à haute résistance permet la réduction des dimensions géométriques ou de l’armature longitudinale.

Retrait et fluage

L’évolution du comportement à la déformation au cours du temps du béton à haute résistance est influencée par sa porosité réduite, son module d’élasticité et sa densité plus élevés. Les changements majeurs observés en comparaison avec le béton à résistance normale sont:

- le retrait endogène est nettement plus élevé
- le retrait de dessiccation diminue clairement lorsque la résistance augmente
- le retrait dû au fluage diminue lorsque la résistance augmente et atteint sa valeur finale plus rapidement

A cause de son retrait endogène élevé au début, le retrait spécifique du béton à haute résistance est plus important que celui du béton à résistance normale. Mais en raison de son retrait de dessiccation plus faible, il en résulte finalement une valeur ultime de retrait plus petite que celui du béton à résistance normale (voir chapitre 3.8.4). La montée en résistance nettement plus rapide du béton à haute résistance conduit également à un développement rapide de la chaleur d’hydratation. Les éléments de construction, entravés dans leur déformation, subissent alors au jeune âge des contraintes imposées dues à la chaleur d’hydratation surmontées par le retrait endogène. Le risque de fissuration est donc plus élevé au jeune âge pour le béton à haute résistance que pour le béton à résistance normale.

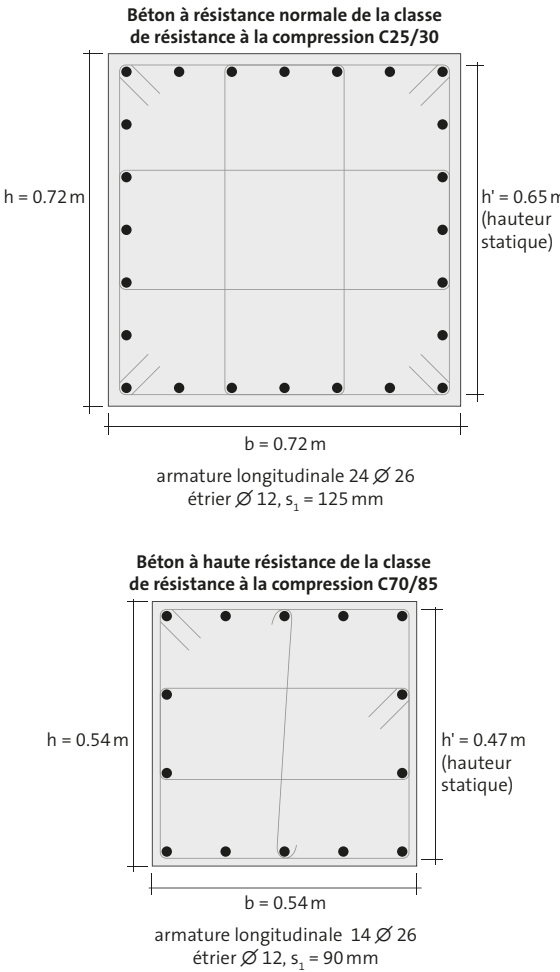


Fig. 7.2.5: Section d’une pile en béton à haute résistance et à résistance normale.

Classe de résistance à la compression	Valeur moyenne de la résistance à la compression sur cylindres f_{cm} [N/mm²]	Valeur moyenne de la résistance à la traction uniaxiale centrée f_{ctm} [N/mm²]	Valeur de calcul pour le module d’élasticité E_{cm} [N/mm²]
C55/67	63	4.2	39 200
C60/75	68	4.4	40 200
C70/85	78	4.6	42 100
C80/95	88	4.8	43 800
C90/105	98	5.0	45 400
Expression analytique	Eq. 3.8.1	Eq. 3.8.6	Eq. 3.8.8 avec $k_E = 10\,000$

Tab. 7.2.2: Propriétés mécaniques des bétons à haute résistance.

7. Bétons pour des applications particulières

7.2 Béton à haute résistance

Résistance au feu

Le comportement au feu des bétons à haute résistance se distingue de celui d'un béton à résistance normale. Les essais au feu révèlent la tendance à l'éclatement des bétons à haute résistance. La raison de ce comportement réside dans la structure plus dense freinant la diffusion de la vapeur d'eau. Au-dessus d'une température de 100° C, l'eau liée chimiquement et physiquement est libérée et s'évapore. La pression de la vapeur d'eau provoque

de fortes contraintes de traction dans l'élément de construction, qui conduisent aux éclatements. De ce fait, la norme SIA 262 recommande l'ajout de fibres polypropylènes (PP) comme mesure particulière. En fondant à une température d'environ 170° C, les fibres PP créent des canaux de décompression de la vapeur d'eau dans la structure du béton et préviennent efficacement les éclatements. A cet effet, il faut déterminer le type de fibres adéquat et le dosage nécessaire pour chaque béton à haute résistance (fig. 7.2.6 et 7.2.7).

L'efficacité de cette mesure particulière (utilisation des fibres PP) doit être contrôlée au moyen d'essais au feu.

Si le dimensionnement suit la norme SN EN 1992-1-1 (Eurocode 2), d'autres mesures constructives peuvent être appliquées au lieu de l'utilisation des fibres PP pour éviter les éclatements du béton d'enrobage, la rupture par perte de l'adhérence de l'armature au béton ou encore le fléchissement de l'armature de compression. Il est possible d'augmenter l'épaisseur d'enrobage, d'appliquer un mortier coupe-feu ou d'ajouter une armature supplémentaire au béton d'enrobage. Ces mesures sont parfois difficiles à mettre en pratique et, par conséquent, moins usuelles que l'ajout de fibre PP.

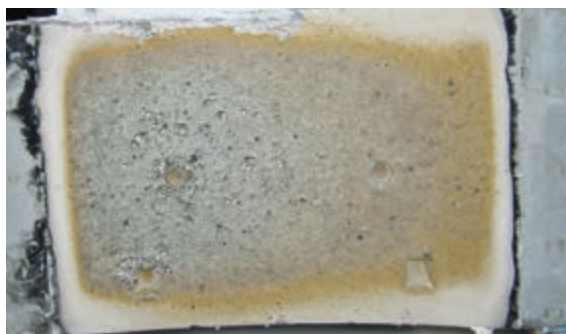
Composition du béton

La composition des bétons à haute résistance varie en fonction des propriétés visées du béton frais et durci (autoplaçant, élément en béton de parement, etc.). Le tableau 7.2.3 fournit quelques formulations typiques de béton vibré, autoplaçant et à faible chaleur d'hydratation, tous à haute résistance.

Fig. 7.2.6:
Élément de voussoir ou de cuvelage en béton à haute résistance sans fibres PP après l'essai au feu.
(Source: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen, Leipzig GmbH).



Fig. 7.2.7:
Élément de voussoir ou de cuvelage en béton à haute résistance avec fibres PP après l'essai au feu.
(Source: Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen, Leipzig GmbH).



		Béton à haute résistance C55/67				Béton à haute résistance C80/95 BAP			Béton à haute résistance C95/105		
		Masse vol. [kg/dm³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]
Ciment	CEM I 52,5 R (Normo 5R)	3.10		400	129						
	CEM II/A-D 52,5 R (Fortico 5R)	3.06					480	157		550	180
Addition	cendre volante	2.24					100	45		50	22
Granulat	sable 0/4	2.68	42	795	297	50	842	314	40	689	257
	gravier roulé 4/8	2.68	20	378	141	25	421	157			
	gravier roulé 8/16	2.68	38	719	268	25	421	157			
	gravillon concassé 4/8	2.68							18	310	116
	gravillon concassé 8/11	2.68							42	724	270
Eau		1.00		150	150		160	160		140	140
Air					15			10			15
Adjuvant	fluidifiant		dosage selon besoin (1–2 % de la masse de ciment)								
Masse volumique et volume du béton frais				2442	1000		2424	1000		2463	1000
Rapport E/C, resp. E/C _{eq}				0.38			0.33			0.25	

Tab. 7.2.3: Exemples de formulations de bétons à haute résistance de différentes classes de résistance à la compression.

7.3 Béton fibré à ultra-hautes performances

7.3.1 Introduction

Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP), aussi appelé ultra high performance concrete (UHPC), est un béton qui se démarque nettement des bétons courants et à haute résistance par sa composition, sa teneur en fibres, son rapport E/C et ses propriétés. Une de ses caractéristiques est sa résistance à la compression extraordinaire, dépassant 150 N/mm² et son rapport E/C extrêmement bas, inférieur à 0.25. L'addition de fibres métalliques en grande quantité, de l'ordre de 1 à 5 % vol., confère à la matrice cimentaire une excellente ductilité en traction (voir chapitre 5.4). Ce comportement ductile résulte d'une capacité élevée de déformation plastique. Au contraire des matériaux à comportement fragile, la rupture des matériaux ductiles est précédée de grandes déformations annonciatrices. En plus de ses propriétés mécaniques particulières, le BFUP présente une excellente durabilité.

7.3.2 Exigences normatives

Les données du tableau 7.3.1 permettent de comparer les propriétés mécaniques et la composition du BFUP avec celles d'autres bétons, ainsi que les normes applicables.

A cause de sa composition et ses propriétés particulières, le BFUP se situe hors du domaine de validité des normes SN EN 206-1 et SIA 262. Le dimensionnement et l'exécution du BFUP sont réglés par le cahier technique SIA 2052 (en préparation).

Spécification

Une distinction est faite entre le BFUP utilisé pour la construction (p.ex. pour l'augmentation de la rigidité ou

de la résistance des tabliers de ponts ou des dalles de bâtiments) ou pour la remise en état et le renforcement (p.ex. étanchéité, parapets, blocs d'ancrage). Les propriétés caractéristiques du BFUP sont entre autres:

- comportement en traction, défini par la résistance à la traction f_{Ut} , la résistance limite élastique à la traction f_{Ute} , le comportement écrouissant ϵ_{Utu} et le comportement adoucissant (énergie de rupture spécifique G_{FU} , ouverture maximale de fissure $w_{Ut,max}$)
- résistance à la compression f_{Uc}
- module d'élasticité E_U
- coefficient de Poisson ν_U
- coefficient de dilatation thermique α_U
- retrait spécifique ϵ_{Us} coefficient de fluage $\phi_{U(t,t0)}$

Les sortes de BFUP sont spécifiées en fonction de leurs différentes propriétés, dont le comportement à la traction du BFUP constitue la base du classement (tab. 7.3.2).

Sorte	U0	UA	UB
f_{Utem} [MPa]	≥ 7.0	≥ 7.0	≥ 10.0
f_{Utum} / f_{Utem}	1.0	≥ 1.0	> 1.2
ϵ_{Utem} [%]	$f_{Ute,m} / E_{Utm}$	> 1.0	> 2.0
G_{FU} [kJ/m²]	> 8.0	—	—

f_{Utem} valeur moyenne de la limite élastique de la résistance à la traction du BFUP (valeur de contrainte atteinte à la limite d'élasticité du BFUP sous traction uniaxiale)
 f_{Utum} valeur moyenne de la résistance à la traction du BFUP
 ϵ_{Utem} déformation d'écrouissage moyenne du BFUP lorsque la résistance à la traction est atteinte
 G_{FU} énergie spécifique de rupture du BFUP (valeur moyenne)

Tab. 7.3.2:
Sortes de BFUP.

Type de béton	Propriétés mécaniques	D_{max} [mm]	Rapport E/C	Normes
Béton	classes de résistance jusqu'à C50/60	8–32	0.40–0.65	SN EN 206-1, SIA 262
Béton à haute résistance	classes de résistance C 55/67 jusqu'à C100/115	8–16	0.25–0.40	SN EN 206-1, SIA 262
Béton fibré à ultra-hautes performances	résistance à la compression $> 150 \text{ N/mm}^2$, haute résistance à la traction et capacité de déformation	4	0.15–0.25	cahier technique SIA 2052 (en préparation)

Tab. 7.3.1:
Types de béton avec leurs références normatives.

7. Bétons pour des applications particulières

7.3 Béton fibré à ultra-hautes performances

Des exigences complémentaires spécifiées en fonction de l'application du BFUP sont possibles, concernant :

- la résistance à la compression
- le module d'élasticité
- la résistance à l'abrasion
- l'aptitude à une mise en place en pente du BFUP frais et autoplaçant

7.3.3 Technologie du béton

Généralités

Les propriétés spécifiques du BFUP, en particulier sa haute résistance à la compression et à la traction ainsi qu'une excellente durabilité, reposent sur les principes suivants de la technologie du béton :

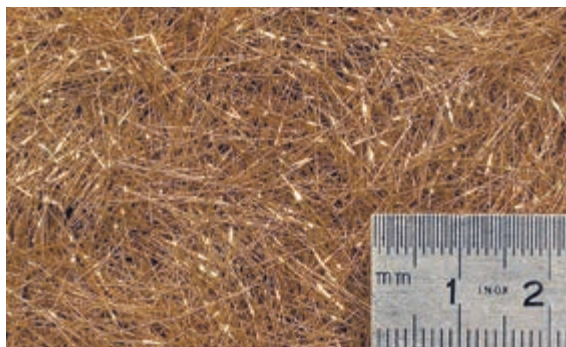
Optimisation du squelette granulaire au niveau des particules les plus fines

La granularité est élargie dans les classes granulaires très fines par l'utilisation de la fumée de silice, permettant de remplir les interstices les plus petits. La substitution simultanée des granulats grossiers par une sélection de sables fins de quartz conduit à une très haute densité de compactage et une microstructure homogène (fig. 7.3.1). Tandis que dans un béton à résistance normale le granulat occupe le plus grand volume, le volume de la pâte de ciment domine dans un BFUP. La grande proportion de pâte de ciment empêche la formation d'un squelette granulaire rigide. Les déformations, comme le retrait, qui n'affectent que la pâte de ciment seront ainsi moins entravées de manière à éviter des microfissures de la pâte de ciment.

Fig. 7.3.1:
Composants principaux du BFUP de gauche à droite: fumée de silice, ciment, sable de quartz.



Fig. 7.3.2:
Comparaison des volumes de fibres courantes: à gauche BFUP avec env. 300 kg/m³ de fibres (3.8 % vol.); à droite béton renforcé aux fibres métalliques avec env. 35 kg/m³ de fibres.



Réduction du rapport E/C

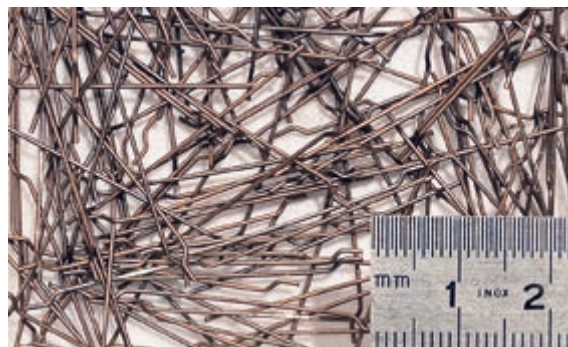
Bien que le BFUP présente une quantité d'eau de gâchage similaire à celle des bétons courants ou à haute résistance, sa teneur en ciment est nettement supérieure. Il en résulte un rapport E/C beaucoup plus bas, en règle générale inférieur à 0.25. La taille moyenne des pores du BFUP est fortement réduite et les pores ne forment pas un réseau interconnecté. De par le très faible rapport E/C, une partie des grains de ciment ne s'hydrate pas et demeure comme filler chimiquement réactif dans le béton et constitue une réserve d'hydratation.

Armature de fibres synthétiques ou métalliques

L'armature de fibres avec un fort dosage (1 à 5 % vol.) confère à la matrice cimentaire une haute ductilité et résistance résiduelle post-fissuration. La répartition homogène des fibres permet d'armer efficacement toute la section de l'élément de construction, du centre jusqu'à la surface (fig. 7.3.2). L'efficacité des fibres dans le BFUP dépend du matériau, du dosage, de la géométrie, de la répartition et l'orientation des fibres. En raison de leurs forts dosages, les fibres ont une influence déterminante sur le comportement mécanique du BFUP.

Ciment

Pour la confection du BFUP, les compositions de béton à base de ciment Portland (CEM I) à faible teneur en alcalins, de ciment Portland composé (CEM II) et de ciment au laitier (CEM III) de toutes les classes de résistance ont été éprouvées dans la pratique. L'utilisation de ciment au laitier (CEM III/B) à faible teneur en clinker a une répercussion avantageuse sur le bilan CO₂ du BFUP.



Granulat

En règle générale, les sables et farines de quartz utilisés présentent des courbes granulométriques spécifiques, p. ex. avec une granularité discontinue, afin d'augmenter la densité de compactage. Selon les exigences et performances visées, le diamètre maximal des sables sera inférieur à 2 mm. La forme des grains influence la consistance et la demande en eau. Il est avantageux d'utiliser des sables séchés, dont la granularité est soumise à un contrôle de qualité sévère.

Adjuvants

Les fluidifiants hautement efficaces et fortement dosés sont nécessaires pour garantir la miscibilité des composants malgré le rapport E/C inférieur à 0.25. Généralement, il s'agit de produits à base de polycarboxylates adaptés de manière optimale au ciment choisi.

Additions

La fumée de silice est très répandue en tant qu'addition au BFUP. De par sa réaction pouzzolanique, la fumée de silice contribue à la densification de la microstructure par ses produits de réaction supplémentaires, renforçant les résistances mécaniques et l'adhérence entre la pâte de ciment, les fibres et le granulat.

Lors de l'utilisation des fibres métalliques, un diamètre des fibres entre 0.10 et 0.15 mm et un élanement des fibres entre 40 et 80 (rapport longueur-diamètre) se sont avérés être un bon compromis entre l'ouvrabilité et l'efficacité. On emploie également des fibres d'alcool polyvinylique (PVA) pour la construction d'éléments auxquels se posent peu d'exigences relatives aux propriétés mécaniques.

Production

Le BFUP est produit soit comme prémix industriel (p. ex. Holcim 707 et 710) soit comme béton prêt à l'emploi dans une centrale à béton. La production en centrale n'est en général seulement possible que pour des BFUP à consistance fluide ou de courtes durées de transport. L'ordre d'introduction suivant dans le mélange a été confirmé dans la pratique: la première moitié de tous les composants pulvérulents – eau de gâchage avec le fluidifiant – l'autre moitié des composants en poudre – fibres. Le dosage de l'eau et des fluidifiants doit être très précis. L'expérience montre que la plupart des malaxeurs sont aptes à la production de BFUP. A cause du grand élanement et le fort dosage des fibres, il faut veiller à leur bonne séparation et répartition homogène dans le béton frais. La durée de malaxage dépend du type de malaxeur, de la charge, de l'ajout de fibres, et se situe entre 10 à 20 minutes.

Consistance

Le BFUP peut être produit avec des consistances variables. Pour les éléments coffrés, on choisira un BFUP fluide, autoplaçant avec un étalement au cône d'Abrams d'environ 800 mm (fig. 7.3.3). La consistance est caractérisée par une haute viscosité, de façon à ce que l'étalement ne soit atteint qu'au bout d'une minute environ. Similaire au béton autoplaçant (chapitre 4.3), la pâte de ciment doit pouvoir maintenir les fibres en suspension. Le dégazage et le compactage ont lieu pendant l'écoulement sous l'effet de la gravité. Les variantes BFUP fluides contenant jusqu'à 2 % vol. de fibres métalliques peuvent être pompées avec des pompes pour mortier. Pour les applications en pente, p. ex. des couches de protection de ponts, il existe des types de BFUP qui peuvent être mis en place selon l'épaisseur de couche jusqu'à une pente de 8 % (fig. 7.3.3). Il faut alors veiller à une adaptation très précise du dosage de l'eau et des fluidifiants.



Fig. 7.3.3: BFUP fluide (en haut), BFUP apte au bétonnage en pente jusqu'à 8 % (en bas).

7. Bétons pour des applications particulières

7.3 Béton fibré à ultra-hautes performances

Mise en place et compactage

Le BFUP fluide est rempli dans le coffrage et se répartit sous l'effet de la gravité. Les vibreurs de coffrage facilitent le flux dans les coffrages étroits, mais il faut prendre garde à ce qu'il n'y ait aucune ségrégation de la matrice cimentaire et des fibres. En cas d'interruption des travaux, les joints de bétonnage doivent être soigneusement mélangés afin d'assurer une continuité satisfaisante.

Les exigences relatives au coffrage sont très élevées. A cause de sa grande fluidité, le coffrage doit être particulièrement étanche. La pression exercée par le béton frais sur le coffrage correspond à la répartition de la poussée hydrostatique. A cause de la grande finesse des constituants et la fluidité du béton frais, la texture de la peau de coffrage s'imprime précisément sur la surface du béton. Le BFUP thixotrope en couche mince pour des applications horizontale de grande superficie peut être travaillé à l'aide d'une règle vibrante.

La mise en place des couches de BFUP sur un support en béton exige une préparation méticuleuse de la surface de contact (fig. 7.3.4 et 7.3.5). Elle nécessite l'élimination de la peau de ciment et des substances affaiblissant la liaison (graisse, huile, etc.), et doit atteindre une rugosité minimale avec des différences de niveau de l'ordre de 5 mm pour un espacement de 10 à 15 mm. Le support doit être saturé d'eau au préalable. On respectera les mêmes consignes valables pour la remise en état du béton à l'aide de produits à base de liants hydrauliques.

Cure

La cure acquiert une signification particulière à cause du rapport E/C très bas du BFUP. Toute perte d'eau est absolument à éviter. Le BFUP doit être recouvert immédiatement après sa mise en place par un film plastique et protégé des intempéries (vent, pluie, soleil, froid). Une cure thermique (apport contrôlé de chaleur et d'humidité) permet d'augmenter la résistance et de stabiliser le retrait en peu de temps.

Sécurité

Les fibres métalliques employées pour la confection du BFUP présentent un risque notable de blessures de la peau et des yeux. Il est nécessaire de prendre des mesures adéquates de protection. En outre les mêmes consignes de sécurité que celles pour le travail avec du ciment et la fumée de silice sont à respecter.



Fig. 7.3.4: Mise en place d'une couche de BFUP à la fois comme renforcement et étanchéité d'un pont.



Fig. 7.3.5: Finition d'une couche de BFUP à l'aide d'une règle vibrante.

7.3.4 Recommandations pour la planification des bétons fibrés à ultra-hautes performances

Domaines d'application

Le BFUP peut être utilisé, pour les nouvelles constructions ou en relation avec des constructions en béton déjà existantes, pour la protection et le renforcement. Il permet de minimiser les dimensions des sections et le poids propre. La figure 7.3.6 illustre des sections de poutre de même résistance. Grâce au BFUP, il est possible d'atteindre, pour des poids propres comparables, des dimensions similaires à celles des poutres en aciers. Dans ce cas, la combinaison du BFUP avec une armature précontrainte dans le sens porteur est judicieuse.

Pour le renforcement d'éléments de construction en béton armé, une couche mince de BFUP ou, en cas d'exigences élevées, de BFUP armé est appliquée (fig. 7.3.7). En principe, il est judicieux d'utiliser le BFUP de manière ciblée pour les parties d'ouvrage fortement exposées, nécessitant des propriétés mécaniques particulières et une durabilité élevée. En règle générale, il n'est pas nécessaire de recourir à des moyens d'assemblages mécaniques entre la couche de BFUP et le béton en béton armé.

Comportement en traction

Grâce à l'armature de fibres, le BFUP atteint une résistance à la traction qui dépasse nettement celle d'un béton à résistance normale. Elle peut être prise en compte dans le calcul statique. Le comportement du BFUP en traction directe présente trois phases – élastique, écouissant et adoucissant (fig. 7.3.8):

- comportement élastique: augmentation linéaire de la déformation lorsque la contrainte monte, retour complet de la déformation lors de la décharge.
- comportement écouissant: accroissement de la déformation par une augmentation de la contrainte de traction, accompagné de la formation de fissures finement dispersées et de faible ouverture (microfissures) et une déformation irréversible après la décharge. Le comportement écouissant se manifeste seulement si la teneur en fibres est suffisante pour que les fibres puissent absorber complètement les contraintes. Si les teneurs en fibres sont insuffisantes aucun écouissement a lieu et la phase de comportement adoucissant suit directement la phase de comportement élastique.
- Comportement adoucissant: baisse des contraintes de traction et augmentation des déformations se concentrant dans une fissure qui s'ouvre progressivement avec l'arrachement des fibres de la matrice cimentaire. Les contraintes de traction diminuent jusqu'à la séparation complète des deux flancs de la fissure. L'ouverture maximale de la fissure correspond environ à la moitié de la longueur des fibres.

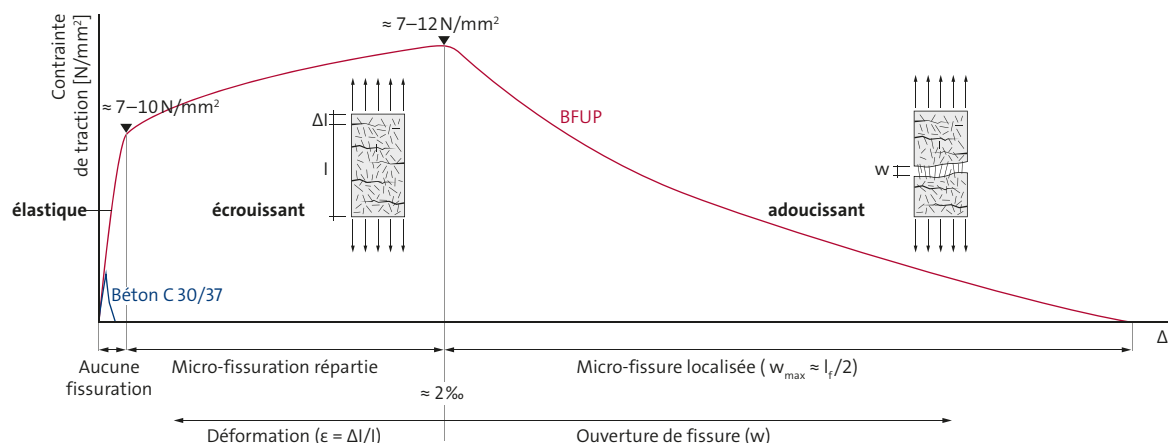


Fig. 7.3.6: Sections transversales de poutres de même résistance conçues avec divers matériaux.

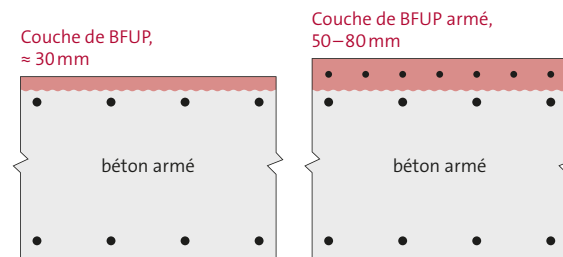
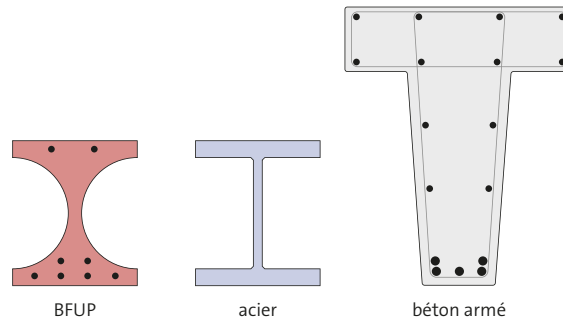


Fig. 7.3.7: Le BFUP comme couche de protection et de renforcement des éléments de construction en béton.

7. Bétons pour des applications particulières

7.3 Béton fibré à ultra-hautes performances

Retrait et fluage

A cause de sa teneur élevée en ciment et son faible rapport E/C, le BFUP peut atteindre un retrait spécifique relativement élevé jusqu'à 1 %. Le retrait correspond presque entièrement au retrait endogène. Le fluage, appelé aussi la capacité de relaxation du BFUP, est également plus élevé que celui du béton à résistance normale. Les contraintes issues des déformations entravées de retrait sont en partie relaxées par le fluage. La combinaison de sa haute résistance à la traction et de sa capacité de déformation (comportement écouvissant), dû à son armature en fibres, permet au BFUP de rester sans fissure et durable même sous un haut degré d'entrave. Ceci est d'une importance particulière dans le cas d'une application du BFUP comme couche de protection ou de renforcement d'un élément de construction existant (fig. 7.3.10).

Durabilité

La structure dense du BFUP offre une très haute résistance à la pénétration de gaz et de fluides. Il en résulte une excellente résistance à la carbonatation, aux chlorures, aux sulfates et au gel en présence de sels de déverglaçage. La durabilité chimique vis-à-vis des attaques acides est élevée. L'armature et les fibres métalliques sont protégées malgré des épaisseurs d'enrobage plus faibles que celles du béton courant. L'enrobage de l'armature du BFUP armé atteint une épaisseur de 10 mm dans les surfaces coffrées et 15 mm dans les surfaces non coffrées. La corrosion des fibres métalliques proches de la surface présente éventuellement un problème esthétique, mais n'a pas d'effet sur la durabilité. Les sollicitations d'abrasion

ou de choc sont bien tolérées grâce à la structure dense et la grande ductilité des fibres métalliques. Le contrôle de la fissuration et des ouvertures des fissures par l'armature de fibres contribue également à la durabilité.

Résistance au feu

Les mêmes remarques concernant la résistance au feu du béton à haute résistance s'appliquent au BFUP (voir chapitre 7.2).



Fig. 7.3.10: Passage de ruisseau préfabriqué dont la face supérieure possède une couche de protection en BFUP.

Fig. 7.3.9:
Arrêt de bus
en BFUP.



7.4 Béton pour parois moulées et pieux forés

7.4.1 Introduction

Les pieux forés et parois moulées appartiennent aux éléments de construction les plus importants dans les fondations et ouvrages géotechniques. Les pieux permettent le transfert des charges des structures vers des horizons porteurs plus profonds du terrain. Les pieux forés et parois moulées servent aussi au soutènement de grandes fouilles. Ils peuvent être préfabriqués ou réalisés en béton coulé en place. Les pieux préfabriqués sont mis en œuvre comme pieux fonnés par battage dans le sol.

Pieux forés

Pour la réalisation des pieux forés en béton coulé en place, un forage est réalisé dans le sol jusqu'à des couches de terrain ou de rochers suffisamment porteuses. En règle générale, les parois du forage sont blindées par un tube, afin d'éviter que les couches environnantes se relâchent et s'effondrent. La cage d'armature est placée dans le forage qui sera rempli avec le béton et dont le tubage sera le cas échéant enlevé à la fin (fig. 7.4.2).



Fig. 7.4.1:
Excavation d'une tranchée pour une paroi moulée.
(Source: BAUER Spezialtiefbau GmbH, Schrobenthausen).

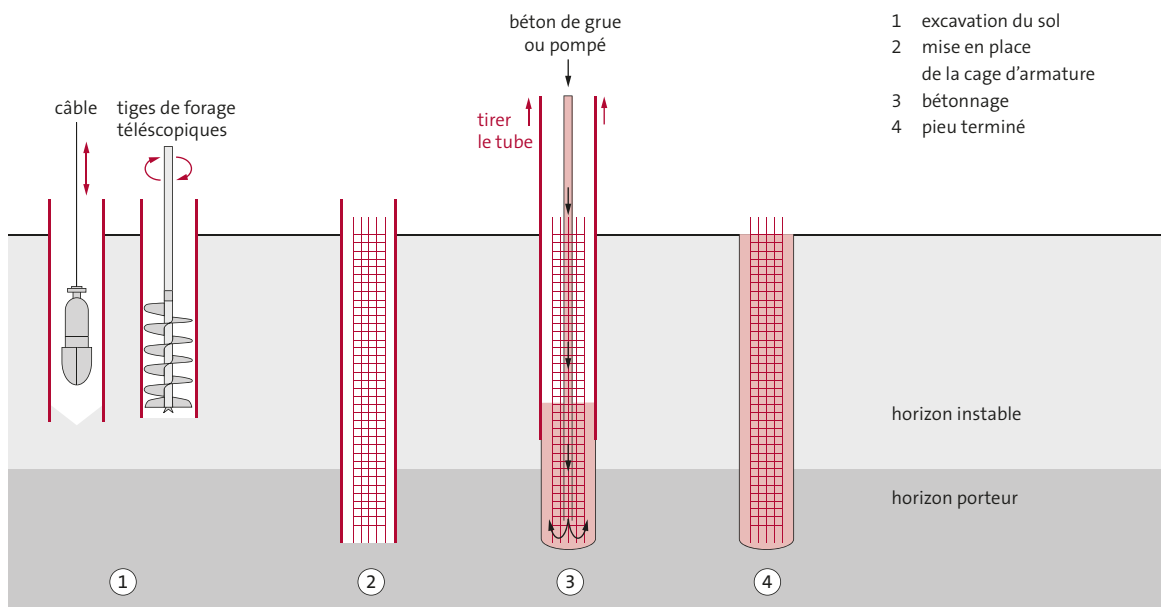
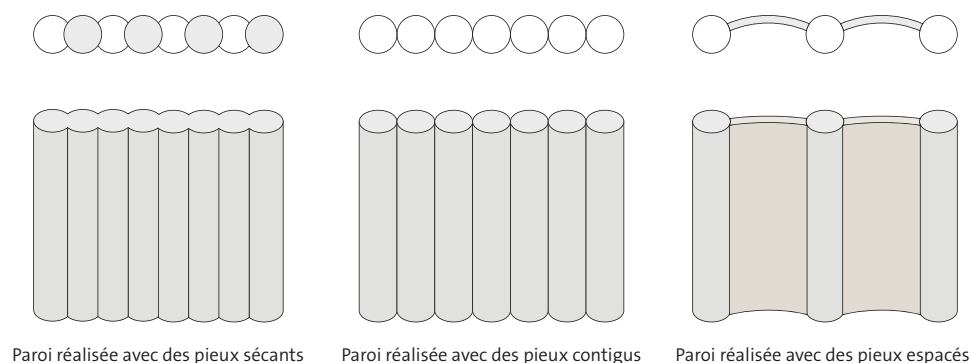


Fig. 7.4.2:
Réalisation d'un pieu foré avec un tube provisoire.

7. Bétons pour des applications particulières

7.4 Béton pour parois moulées et pieux forés

Fig. 7.4.3:
Types de parois
de pieux forés,
vue d'en haut et de
face.



Paroi réalisée avec des pieux

Ce type de paroi se compose de plusieurs pieux forés en série, dont la disposition dépend des exigences posées. On distingue trois types de parois (fig. 7.4.3):

- paroi réalisée avec des pieux sécants
- paroi réalisée avec des pieux contigus
- paroi réalisée avec des pieux espacés

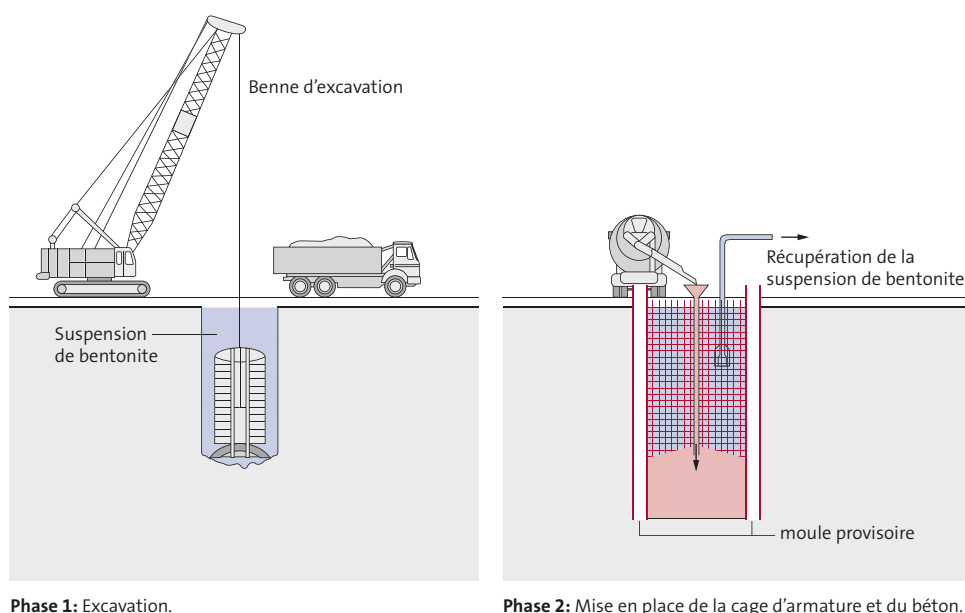
Dans la pratique, les parois étanches de pieux forés sont obtenues par le recoupement des pieux entre eux. Dans une première phase, les pieux, appelé pieux primaires, sont réalisés avec un certain espacement. Ils sont ensuite recoupés par des pieux secondaires qui sont armés avant le bétonnage. La paroi de pieux contigus est réalisée avec des pieux jointifs. La paroi de pieux espacés ne comporte que le nombre de pieux armés nécessaire du point de vue statique. Les espaces entre les pieux sont obturés soit avec du béton coulé en place, du béton projeté ou le terrain affleurant.

Paroi moulée

Les parois moulées sont exécutées avec des procédés en une ou deux phases. Les parois moulées en coulis sont constituées d'un coulis autodurcissant qui est utilisé comme fluide d'excavation. La paroi moulée en béton classique est réalisée en deux phases (fig. 7.4.4). Dans une première étape, la tranchée est excavée et soutenue par un fluide d'excavation (p.ex. suspension de bentonite). La deuxième étape consiste à la mise en place de la cage d'armature et au remplissage, avec le béton refoulant, le fluide d'excavation sera récupéré pour être traité et réutilisé.

Les pieux forés et des parois moulées peuvent traverser des couches de terrain sèches ou aquifères, ou contenant des substances chimiquement agressives pour le béton. Puisque le compactage n'est pas possible en profondeur, ce béton est la plupart du temps confectionné avec une consistance fluide. Des exigences particulières existent pour les bétons pour pieux forés et parois moulées relatives à leur composition, afin qu'ils conservent leur fluidité sans ségrégation pendant la mise en place, tout en atteignant la durabilité visée.

Fig. 7.4.4:
Réalisation d'une
paroi moulée en
deux phases.



Phase 1: Excavation.

Phase 2: Mise en place de la cage d'armature et du béton.

7.4.2 Exigences normatives

Les exigences à l'égard des bétons pour pieux forés et parois moulées sont définies dans la norme SN EN 206-1. Les bétons coulés en place pour pieux forés et parois moulées sont classés en quatre sortes, c.-à-d. pour des sollicitations élevées (P1 et P2) et des sollicitations normales (P3 et P4), sans qu'une classe d'exposition soit définie. Elles se distinguent en fonction des conditions de mise en place, au sec ou sous l'eau, au niveau des exigences minimales relatives à la composition et aux essais de durabilité. En plus, les normes SN EN 1536 «Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux forés» et SN EN 1538 «Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées» s'appliquent.

Les bétons pour pieux forés et parois moulées sont confectionnés habituellement dans les classes de résistance C 20/25 à C 30/37. Les exigences de durabilité, p. ex. la résistance à la RAG ou aux sulfates, doivent être spécifiées en fonction des particularités du projet. Une

attaque par sulfates paraît peu probable pour la classe P1. Les détails concernant les bétons résistants à la RAG ou aux sulfates figurent au chapitre 6.4, respectivement 6.3. Le tableau 7.4.1 fournit les exigences de base et complémentaires, ainsi que les exigences minimales relatives à la composition.

Les exigences à l'égard de la composition des bétons pour pieux forés et parois moulées tiennent compte des conditions particulières de leur mise en place. Ainsi, les sortes de béton P2 et P4 doivent avoir une teneur en ciment plus élevée et une consistance fluide afin d'assurer une mise en place stable et sans ségrégation sous l'eau. Du fait de sa fluidité, il est préférable de mesurer la consistance du béton par des essais et mesures à l'étalement. Les classes de la résistance à la compression sont relativement basses, parce que le béton ne peut être compacté. Les valeurs indicatives de la teneur en farines et la teneur minimale en ciment plus élevée proviennent des conditions particulières de mise en place.

Désignation des bétons pour pieux forés et parois moulées		Fortes sollicitations		Sollicitations normales	
		P1 au sec (NPK H)	P2 sous l'eau (NPK I)	P3 au sec (NPK K)	P4 sous l'eau (NPK L)
Exigences de base					
Classe de résistance à la compression minimale		C25/30		C20/25	
Classe d'exposition		sans indication de classes d'exposition afin d'éviter des malentendus			
Diamètre maximal du granulat		D _{max} 32			
Classe de chlorure		Cl 0.10			
Classe de consistance		F4 (trés molle)	F5 (fluide)	F4 (trés molle)	F5 (fluide)
Exigences complémentaires					
Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage (p.ex. pour des pieux affleurant)		évt. moyenne		néant	
Résistance à la RAG		selon cahier technique SIA 2042			
Résistance aux sulfates		pas d'attaque de sulfates	spécifique au projet	néant	
Exigences minimales relatives à la composition					
Rapport E/C maximal		0.50	0.50	0.60	0.60
Dosage minimal en ciment [kg/m³]		330	380	330	380
Granulat		selon SN EN 12620			
Valeurs indicatives pour la teneur en farines [kg/m³]	D _{max} > 8 mm	≥ 400			
	D _{max} ≤ 8 mm	≥ 450			
Types de ciment admis		selon sortes de béton D (T1) et E (T2)		selon sortes de béton C à G	

Tab. 7.4 1: Exigences de base et complémentaires relatives aux bétons pour pieux forés et parois moulées de la norme SN EN 206-1.

7. Bétons pour des applications particulières

7.4 Béton pour parois moulées et pieux forés

7.4.3 Technologie du béton

Généralités

Outre le respect des exigences normatives, un béton pour pieux forés et parois moulées doit présenter les propriétés déterminantes suivantes :

- bonne aptitude à l'écoulement
- haute stabilité et résistance à la ségrégation
- durée d'ouvrabilité suffisamment longue pour la mise en place et le cas échéant l'enlèvement des colonnes de bétonnage

Ces propriétés assurent l'enrobage de l'armature et la formation d'une structure dense de béton même en absence de compactage.

Ciment

Pour les bétons pour pieux forés et parois moulées tous les ciments sont admis selon la norme SN EN 206-1, sauf le CEM II/B-LL et le CEM III/A. Les ciments Portland composés se prêtent particulièrement bien à cause de leur haut pouvoir de rétention d'eau qui confère au béton frais une haute stabilité. Le choix du ciment dépend du mode de mise en place du béton. Les pieux préfabriqués sont généralement confectionnés avec un ciment à haute résistance au jeune âge permettant un décoffrage rapide. Par contre pour les bétons coulés en place, un début de prise normal et une montée moyenne en résistance seront préférés. Ceci facilite les travaux de forage parfois imprévisibles, de mise place lente sous l'eau, de forage des pieux sécants.

Le choix du ciment a encore plus d'importance lors d'une mise en place sous l'eau. Les exigences relatives à la résistance RAG ou aux sulfates, ainsi que les prescriptions officielles quant au lessivage des chromates, sont à respecter. Ceci ne peut, en général, être atteint qu'au moyen des ciments Portland composés (p. ex. Optimo 4, Robusto 4R-S).

Granulat

En principe, les exigences de la norme SN EN 12620 s'appliquent aux granulats. Pour obtenir la teneur élevée en farine nécessaire, une courbe granulométrique riche en sable, comparable à celle recommandée pour le béton pompé est à avantager (voir chapitre 4.1). La teneur en sable ($d \leq 4 \text{ mm}$) devrait dépasser une proportion de 40 % en masse de la totalité du granulat. Une granularité discontinue n'est pas admissible. Le diamètre maximal du granulat ne peut être supérieur à 32 mm, ni dépasser un quart de l'espacement des barres d'armatures longitudinales.

Adjuvants

Les bétons pour pieux forés et parois moulées sont habituellement produits avec des fluidifiants afin de conférer au béton frais la cohésion et la fluidité désirées. Il faut veiller à ce que le fluidifiant employé soit non seulement suffisamment efficace, mais qu'il offre également un

temps d'ouvrabilité aussi long que possible. De plus, on a recours à des retardateurs de prise pour garantir le temps d'ouvrabilité souhaité et comme mesure de précaution en cas d'interruption du bétonnage.

Additions

Une teneur en farines suffisante peut être assurée par un ajout d'additions. L'emploi de cendres volantes est utile, notamment en présence de granulats concassés avec un besoin en pâte de ciment accru, et pour renforcer l'aptitude à l'écoulement du béton (classe de consistance F5). La prise en compte des cendres volantes pour la teneur minimale en ciment (concept du coefficient k) permet une réduction modérée de la résistance et de son évolution, ce qui peut présenter un avantage dans le cas des parois réalisées en pieux sécants.

Le concept du coefficient k peut s'appliquer sans aucune restriction pour le ciment Holcim Robusto 4R-S (CEM II/B-M (S-T)), mais pour le ciment Holcim Optimo 4 (CEM II/B-M (T-LL)) seulement pour des pieux forés temporaires ou au sec.

Consistance

Le béton pour pieux forés et parois moulées doit, en règle générale, être mis en place gravitairement au travers d'une colonne de bétonnage. Pour des cas particuliers, son étalement se situera entre 470 et 530 mm, correspondant à un affaissement entre 120 et 180 mm. Dans la majorité des cas, l'étalement sera compris entre 570 et 630 mm correspondant à un affaissement entre 170 et 230 mm.

Mise en place

Différents procédés sont à disposition pour la mise en place du béton, p. ex. à l'aide d'un tube de déversement, d'un tube de pompage ou d'un tube de répartition. Les particularités de chaque mode de mise en place sont à respecter. Sous l'eau, respectivement le fluide d'excavation, le béton est coulé en place à l'aide de tubes plongeurs. Le tube plongeur est placé sur le fond de la tranchée ou du forage de manière à ce que le béton chasse l'eau et substitue la suspension bentonitique vers le haut au fur et à mesure du bétonnage. Le béton est coulé du bas vers le haut, ce qui permet de minimiser les impuretés, les ségrégations ou les mélanges avec de l'eau (changement du rapport E/C). La suspension refoulée pendant le bétonnage est au fur et à mesure récupérée, traitée pour être réutilisée sur les ouvrages suivants.

7.4.4 Recommandations pour la réalisation du béton pour pieux forés et parois moulées

Enrobage de l'armature

La norme SIA 118/262 contient des indications concernant les conditions générales des travaux géotechniques pour la planification et la soumission du béton pour pieux forés et parois moulées. Les pieux préfabriqués doivent respecter les exigences de la norme SIA 262 à l'égard des épaisseurs d'enrobage de l'armature. Celles-ci doivent être augmentées dans les pieux en béton coulé en place en fonction du mode de réalisation:

- c_{nom} = 60 mm pour pieux avec tubage
- c_{nom} = 75 mm pour pieux sans tubage ou coulés sous l'eau

Spécification

Les bétons pour pieux forés et parois moulées sont, en général, définis en tant que béton à propriétés spécifiées.

Exemple 25

Béton selon norme SN EN 206-1, sorte P2

Béton de pieux forés, sous l'eau

Classe de résistance à la compression C25/30

Diamètre maximal du granulat D_{max} 32

Classe de chlorures Cl 0.10

Classe de consistance F5

Exigences complémentaires:

Résistance aux sulfates

Retardement du début de prise de 4 heures

Compositions de béton

Le tableau 7.4.2 donne des exemples de compositions courantes pour des bétons de pieux forés.

			Béton pour pieux forés P3 au sec			Béton pour pieux forés P2 sous l'eau			Béton pour pieux forés P2 sous l'eau, en cas d'attaque de sulfates		
		Masse volumique [kg/dm³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]
Ciment	CEM II/B-M (T-LL) (Optimo 4)	3.03		340	112		380	125			
	CEM II/B-M (S-T) (Robusto 4R-S)	3.05								320	105
Addition	cendre volante	2.24								80	36
Granulat	sable 0/4	2.68	48	874	326	42	766	286	42	765	285
	gravier 4/8	2.68	10	182	68	12	219	82	12	218	82
	gravier 8/16	2.68	20	364	136	21	383	143	21	383	143
	gravier 16/32	2.68	22	401	150	25	456	170	25	455	170
Eau		1.00		198	198		184	184		170	170
Air					10			15			10
Adjuvant	fluidifiant, retardateur		selon besoin (0.2 à 0.6 de la masse de ciment)								
Masse volumique et volume du béton frais				2360	1000		2388	1000		2391	1000
Rapport E/C, resp. E/C _{ég}			0.58			0.48			0.48		

Tab. 7.4.2: Exemples de formulations de bétons pour pieux forés pour différentes sollicitations.

7.5 Béton pour revêtements routiers

7.5.1 Introduction

Les dalles de roulement, aussi appelées couches de surface en béton ou revêtements en béton, sont des éléments de construction fortement sollicités par les charges du trafic, l'abrasion, les cycles thermiques journaliers et les effets du gel en présence de sels de déverglaçage. Les couches de surface en béton doivent présenter une haute durabilité, notamment sous un trafic intense avec d'importantes charges par essieu. Les ornières connues avec les revêtements bitumineux n'apparaissent pas dans des revêtements en béton à cause de leur meilleure répartition des charges, leur plus grande rigidité et stabilité dimensionnelle, même sous des températures élevées. Il en résulte une longue durée de service et de faibles coûts d'entretien. La sécurité du trafic est influencée positivement par leur bonne qualité antidérapante, leur haute résis-

tance au feu et la teinte claire de leur surface, particulièrement important dans les tunnels. A l'opposé du bitume, la température du béton frais au moment de sa mise en œuvre est proche de la température ambiante.

Les revêtements en béton sont utilisés avantageusement pour les surfaces de roulement fortement sollicitées comme les autoroutes, les giratoires, les arrêts de bus, les pistes d'aéroports et des terminaux routiers ou encore pour des chemins agricoles (fig. 7.5.1). Une planification précise de tous les détails constructifs et une exécution soigneuse sont importantes pour remplir les hautes exigences posées à la qualité et la mise en œuvre du béton.

Fig. 7.5.1:
Couches de surface
en béton: auto-
route (en haut à
gauche), giratoire
(en haut à droite),
arrêt de bus (en bas
à gauche) et chemin
agricole (en bas à
droite).



Exigences	Types standards 1–3: routes et autoroutes, giratoires, arrêts de bus, places	Type standard 4: routes rurales et chemins forestiers, voies de roulement, pistes cyclables et trottoirs
Référence	béton selon SN EN 206-1	
Classes d'exposition (CH)	XC4, XD3, XF4	XF3, XC4
Classe de résistance à la compression	C30/37	C25/30
Résistance à la flexion après 28 jours (essai selon SN EN 12390-5, prisme 120 × 120 × 360 mm)	5.5 N/mm ²	4.5 N/mm ²
Teneur en air	3.0 % vol. pour diamètre maximal 32 mm 3.5 % vol. pour diamètre maximal 16 mm	
Granulat selon SN EN 670 102b-NA, SN 670 115	D _{max} 32 mm, PSV ≥ 44	

Tab. 7.5.1:
Exigences à l'égard
du béton des
couches de surface
selon la norme
SN 640 461b.

7.5.2 Exigences normatives

Généralités

Les exigences relatives aux revêtements en béton pour routes et autoroutes, giratoires, arrêts de bus et places, ainsi que routes rurales et chemins forestiers, bandes de roulement, pistes cyclables et trottoirs sont définies dans la norme SN 640 461b «Couches de surface en béton». Pour les applications spéciales, telles que les aéroports, les surfaces avec des exigences extraordinaires ou des modes de constructions particuliers, d'autres principes de dimensionnement sont à respecter. Ils ne sont pas traités ici. On distingue les quatre types suivants de couches de surface en béton:

- couches de surface en béton avec joints (dalles en béton)
- couches de surface en béton composite
- couches de surface en béton avec armature continue
- couches minces de surface en béton (whitetopping)

En Suisse, on utilise pratiquement exclusivement des dalles en béton subdivisées par des joints. Les autres types de construction n'ont qu'une faible importance et ne seront pas traités en détail.

Couches de surface avec joints (dalles en béton)

Les dalles en béton remplissent la fonction de couche de roulement et/ou de couche de base. Elles font partie de la chaussée résistante au gel et doivent être exécutées avec une pente afin d'évacuer les eaux de surface. Les dalles en béton peuvent être posées en monocouche ou bicouche. La couche supérieure est définie comme béton supérieur et la couche inférieure comme béton inférieur. On distingue quatre types standards:

- routes et autoroutes
- giratoires
- arrêts de bus et places

- routes rurales et chemins forestiers, voies de roulement, pistes cyclables et trottoirs

Les exigences formulées concernent la planification (voir chapitre 7.5.4) et le béton (tab. 7.5.1).

Surfaces de roulement

Pour satisfaire aux besoins de sécurité du trafic, de confort de conduite et de minimisation des émissions sonores, des exigences spécifiques sont formulées relativement à la texture, la qualité antidérapante, la planéité transversale et longitudinale, ainsi qu'aux bruits de circulation. Ces exigences sont définies dans les normes SN 640 510, SN 640 511, SN 640 512, SN 640 516, SN 640 530 et SN 640 520.

La qualité antidérapante est un des paramètres plus importants des chaussées et décrit l'effet de la nature de la surface de roulement sur le frottement entre le pneu du véhicule et la surface de roulement. Ce coefficient de frottement est décisif pour les forces transmises du véhicule à la surface de roulement (forces d'accélération, de freinage et de conduite) et donc pour la sécurité du trafic. Plus le frottement est élevé, plus la transmission des forces et l'adhérence à la surface de roulement seront élevées. Une bonne qualité antidérapante est basée sur les effets combinés de la micro- et macrotexture. La microtexture couvre le domaine de 0.001–0.5 mm, la macrotexture celui de 0.5–50 mm.

La macrotexture est essentiellement une fonction de la granularité du granulat et du dosage en ciment du béton. En cas de vitesses de roulement élevées, elle est importante pour l'évacuation de l'eau hors de la surface de contact pneu/surface de roulement. Par contre, la microtexture résulte de l'état de surface du granulat et détermine la surface de contact avec le pneu. La qualité antidérapante d'une surface de chaussée se modifie au cours du temps sous les effets de l'altération et de l'abra-

7. Bétons pour des applications particulières

7.5 Béton pour revêtements routiers

sion par le trafic. La poudre de quartz contenue dans les poussières de routes a un effet abrasif.

Essais

Les couches de surface en béton sont soumises à un programme d'essai en trois phases. Comme pour d'autres constructions en béton, l'aptitude à l'emploi du béton et du granulat est démontrée à l'aide des épreuves de formulation. Pour les projets exigeants, une gâchée et une planche d'essai peuvent être convenues afin de contrôler les propriétés spécifiées de béton frais et durci ainsi que les conditions de mise en place, y compris les caractéristiques de la surface finie. En tout cas pendant la mise en œuvre, on contrôlera les propriétés de béton frais et durci, (résistance à la compression, à la flexion, au gel en présence de sels de déverglaçage) sur des éprouvettes ou carottes prélevées dans la couche de béton, ainsi que les caractéristiques de la surface (niveau, planéité, qualité antidérapante) et l'exécution (joints, goujons). Les essais de résistance à la flexion et à la compression sont décrits au chapitre 3.8, celui de la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage au chapitre 6.2.

7.5.3 Technologie du béton

Une haute résistance à la compression et à la flexion ainsi qu'au gel en présence de sels de déverglaçage et à l'abrasion sont indispensables pour une durabilité suffisante. De manière générale, la résistance à l'abrasion est obtenue au travers des résistances mécaniques et d'une cure soigneuse de la surface du béton, mais aussi par une résistance minimale au polissage du granulat.

Ciment

En Suisse, on emploie traditionnellement du ciment Portland CEM I de la classe de résistance 42,5 pour les couches de surface en béton. L'aptitude des autres ciments est à prouver par des essais relatifs aux propriétés du béton. En plus, il faut respecter les prescriptions de la norme SN EN 206-1 en fonction des classes d'exposition. En cas d'exigences particulières, telle la résistance à la RAG l'utilisation de ciments composés (p. ex. CEM/II B-M (S-T), Robusto 4R-S) est recommandée.

Granulat

En général, les couches de surface en béton sont confectionnées avec un granulat d'un diamètre maximal de 32 mm. Pour des couches minces en béton, le diamètre maximal est abaissé à 16 mm et pour des surfaces à faibles émissions sonores à 11 mm voire à 8 mm. Une résistance au polissage (PSV) minimale de 44 unités est exigée pour l'emploi dans des couches de surface en béton (voir chapitre 1.3.3).

Un granulat grossier concassé (gravillons concassés au lieu de graviers roulés) et un diamètre maximal réduit (p. ex. 16 mm au lieu de 32 mm) peuvent augmenter la résistance à la flexion. Le granulat concassé renforce la rigidité du béton jeune et présente une résistance au polissage plus élevée. Une amélioration supplémentaire de la qualité antidérapante est obtenue par des granulats durs qui sont incorporés dans la surface du béton frais. En Suisse, ce sont surtout le corindon synthétique, mais aussi des copeaux métalliques et du carbure de silicium qui sont employés avec des dosages habituels de l'ordre de 1 kg/m².

Adjuvants

Les entraîneurs d'air sont employés pour les couches de surface en béton. Les fluidifiants ne doivent pas provoquer un ramollissement ultérieur du béton frais.

Consistance

Les engins de mise en place (finisseuses à coffrage glissant) demandent des bétons de consistance raide (classe de consistance C1), pour que les faces latérales de la couche de béton frais ne se tassent pas. Il ne doit pas se former en surface du béton de pellicule de mortier fin, ceci indépendamment du mode de mise en place. La mise en œuvre manuelle sera exécutée avec un béton de consistance ferme (classe de consistance C2).

Fig. 7.5.2:
Face latérale stable
du revêtement,
constitué d'un
béton à rigidité élevée avant la prise
(en haut) et surface
lisse et compactée
par la finisseuse
(en bas).





Fig. 7.5.3: Talochage d'un revêtement en béton mis en place manuellement.

Mise en place, compactage et cure

La dalle en béton peut être mise en place en une ou deux couches. Une mise en place monocouche exige que toute l'épaisseur de la dalle ait la qualité d'une couche supérieure et nécessite par conséquent des grandes quantités de gravillons de haute qualité. Avec la mise en place en deux couches, seul le béton supérieur exige des granulats d'excellente qualité, tandis que le béton inférieur peut être confectionné avec un granulat recyclé ou local. Cependant, le système monocouche permet des économies sur le coût des machines et du personnel.

La mise en place manuelle de petites surfaces (p. ex. giratoires ou arrêt de bus) ou la mise en place dans des conditions d'espace restreint se font à l'aide d'un coffrage fixe, qui doit être bien ancré et fermement appuyé sur le sol, puisqu'il sert de référence de nivellement (fig. 7.5.3).

Le béton doit être réparti régulièrement sur toute la largeur de la dalle. Les ségrégations ou pré-compactages incontrôlés sont à éviter. Dans le cas d'un système bicouche, le béton inférieur et supérieur peuvent être mis en place à l'aide d'une finisseuse glissante travaillant en deux couches ou par deux finisseuses l'une à la suite de l'autre. Il faut alors veiller à respecter exactement le nivellement correct du béton inférieur pour assurer l'épaisseur minimale de 4 à 5 cm du béton supérieur. Le béton inférieur ne peut précéder le béton supérieur qu'à la mesure que le béton inférieur ne montre pas de signes visuels de dessiccation ni semble prendre prise avant le compactage. Le béton supérieur est posé «frais sur frais»

pour l'obtention d'une adhérence durable entre les deux couches. La couche en béton paraît alors monolithique et est capable de supporter des contraintes externes et internes sans dégâts.

Le béton doit être compacté régulièrement et complètement sur toute la section, tout en respectant scrupuleusement la consistance et la densité de parement du béton frais. Les finisseuses à coffrage glissant compactent le béton sur toute la largeur de mise en place à l'aide d'aiguilles vibrantes qui sont maintenues en hauteur et en direction. Leur écartement est déterminé en fonction de leur rayon d'action. Il faut éviter l'apparition de «chemins de vibration» (enrichissement en mortier fin). D'autre part, l'avancement mécanique et continu de la finisseuse prévient des inégalités dues à un compactage irrégulier. Lorsque la mise en place est manuelle, il faut, après le premier compactage au moyen d'aiguilles vibrantes, compléter l'opération avec d'autres engins (poutres vibrantes), agissant sur toute la largeur de mise en place.

Le surfacage des revêtements posés à la finisseuse est effectué par un dispositif de lissage qui permet d'obtenir la planéité requise. Dans le cas d'une mise en place manuelle, le surfacage est exécuté au moyen d'une règle ou d'une poutre vibrante. Le talochage et le lissage mécaniques (lisseuse à pales) sont prohibés (voir chapitre 4.4). Le compactage entraîne la formation d'une fine couche de mortier fin, riche en fines, à la surface, qu'il faut limiter au maximum.

7. Bétons pour des applications particulières

7.5 Béton pour revêtements routiers

Surfaçage

Le surfaçage final, après le compactage et lissage de la couche de béton, confère au revêtement la qualité antidérapante requise pour l'usage prévu.

Balai

Après le lissage, la surface est structurée à l'aide d'un balai. Cette opération s'effectue depuis une plateforme de travail, à partir de laquelle on tire le balai sous un angle très faible, en long et en large (fig. 7.5.4).

Toile de jute

Après le lissage, le revêtement en béton peut également être surfacé dans le sens longitudinal, à l'aide de toiles de jute (poids minimal 300 g/m²). Pour ce faire, on accroche des toiles de jute à la finisseuse ou à la plateforme de travail qui les traîne derrière elle (fig. 7.5.5). Leur surface de contact avec le béton, dans le sens de la traînée, doit être au moins de deux mètres. Au cours du surfaçage, la toile de jute sera mouillée, voire lavée à l'appari-

tion des grumeaux de mortier, dont le poids accru provoque des traces et des creux à la surface du béton ou encore lorsque le mortier sèche sur la toile.

Béton lavé, brossé

Les surfaces en béton lavé ont fait leurs preuves pour réduire les émissions sonores. La couche lavée est confectionnée avec un gravillon dont le diamètre maximal est de 8 mm ou 11 mm. Ce béton de gravillon, d'une épaisseur de 4 cm environ, est mis en place «frais sur frais» en tant que couche supérieure sur un béton inférieur de composition courante. Ce procédé requiert une opération supplémentaire directement après le lissage, soit la pulvérisation d'un retardateur empêchant la surface de durcir. Un produit de cure est simultanément appliqué.

Le surfaçage final a lieu après fraisage des joints transversaux et consiste à traiter la surface du béton au moyen d'un engin muni de brosses qui enlève toutes les particules meubles de la surface du béton (fig. 7.5.6). Immédiatement après le brossage, on pulvérise à nouveau un produit de cure. La profondeur de rugosité doit être de 0.8 mm à 1.1 mm pour un diamètre maximal du granulat de 8 mm.

Fig. 7.5.4:
Surfaçage au balai
depuis une plate-
forme de travail.



Fig. 7.5.5:
Surfaçage à la toile
de jute.



Fig. 7.5.6: Surface de béton lavé réalisée par le brossage de la pâte de ciment non durcie.

Cure

La première mesure, à exécuter immédiatement, consiste à pulvériser un produit de cure sur la surface du revêtement. Ce produit empêche la déperdition d'eau jusqu'à l'application des mesures ultérieures, mais il est sans influence sur la texture de surface du revêtement. La quantité à pulvériser doit être choisie en fonction du produit de cure et de la rugosité de la surface, de manière à obtenir une fine pellicule continue. La quantité varie généralement en fonction de la structure de la surface entre 150 et 200 g/m². Un excès de produit de cure peut retarder son élimination naturelle ou réduire la qualité antidérapante initiale du revêtement. Sur la base des classes d'exposition, il faut respecter normalement la classe de cure NBK 4 selon la norme SIA 262 (voir chapitre 3.6.2).

Les surfaces traitées avec des produits de cure doivent rester fermées à la circulation tant que l'on ne peut pas exclure des dommages à la pellicule de protection et la

dessiccation précoce du béton qui en résulte. D'autres mesures de protection et de cure pour les couches de surface en béton sont employées:

- arrosage sur toute la surface pour maintenir la surface constamment humide
- recouvrement par des nattes freinant l'évaporation comme les toiles de jute ou les géotextiles
- recouvrement par des nattes thermiques isolantes empêchant une évaporation de l'eau et un réchauffement ou refroidissement du béton

Le recouvrement des revêtements en béton au moyen de feuilles plastiques est une mesure très efficace contre la pluie battante, mais inapproprié comme seul traitement de cure.

7.5.4 Recommandations pour la planification des couches de surface en béton

Généralités

Les détails de planification des dalles en béton avec des joints sont définis dans la norme SN 640 461b à l'égard des charges de trafic pondéral, des types de couche supérieure et des types de construction, de l'épaisseur (d) et la longueur des dalles (L) ainsi que leur rapport (d/L), de l'armature, des goujons (diamètre, longueur, écartement) et des fers de liaison (diamètre, longueur, écartement).

Epaisseur et dimensions des dalles

Les revêtements en béton sont construits habituellement sur de longues distances et de grandes surfaces. La contraction du béton qui accompagne le refroidissement et le retrait, entravée par le frottement avec le substrat, provoque des contraintes dans ces éléments de grande superficie, qui peuvent conduire à leur fissuration. Pour éviter des fissures indésirables dans les dalles en béton non armé, les couches en béton sont subdivisées par des joints transversaux et longitudinaux. L'épaisseur de la dalle est fixée en fonction du type d'utilisation (tab. 7.5.2). La détermination des dimensions de la dalle suit certaines règles, illustrées dans la figure 7.5.7.

Joints

Les joints absorbent les déformations dues aux charges, au retrait et au retrait thermiques des dalles en béton non armé. Il faut établir un plan des joints qui tient compte de toutes les conditions cadres, telles que la géométrie, le sens de circulation, la disposition des ouvrages d'art, la pente, les regards, etc.

Selon leur orientation et fonction, les principaux types suivants sont distingués:

- joints transversaux (avec ou sans présciage)
- joints longitudinaux (avec ou sans présciage)
- joints de dilatation (raccordements)
- joints de raccordement (joints de bord, de transition)

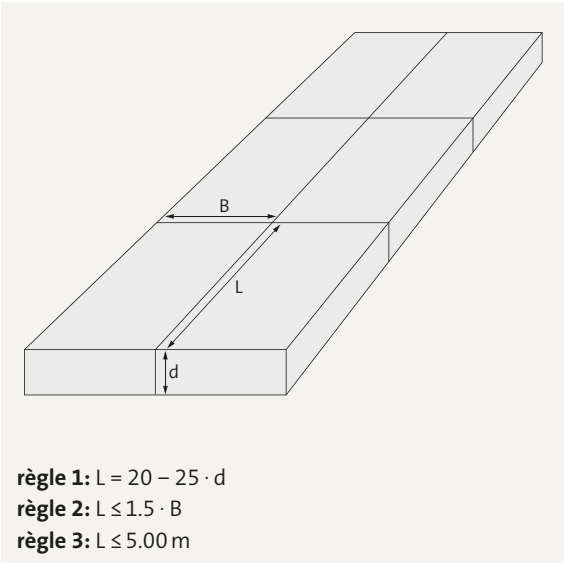


Fig. 7.5.7:
Règles de dimensionnement des dalles en béton non armé selon SN 640 461b.

	Epaisseur de la dalle d [mm]	Longueur usuelle de la dalle L [m]
Routes et autoroutes	220–260	5
Giratoires	240–260	6–9
Arrêts de bus, places	220–260	5
Routes rurales et chemins forestiers, bandes de roulement, pistes cyclables et trottoirs	150–180	3.5–5

Tab. 7.5.2:
Epaisseur des dalles en béton en fonction de leur utilisation selon SN 640 461b.

Les joints transversaux sont coupés dans le béton durcissant. La couche de béton est sectionnée sur environ un tiers de sa hauteur, de manière à obtenir un affaiblissement local de la section et la formation d'une fissure contrôlée. Le sciage a d'habitude lieu entre 6 et 24 heures après le bétonnage. L'entaille doit être faite assez tôt pour éviter toute fissuration incontrôlée. Les joints longitudinaux sont soit fraisés soit des joints de raccordements. Tous les joints doivent être rendus étanches, au moyen de produits d'obturation ou de scellements de joints vis-à-vis de la pénétration de l'eau et des salissures. La dalle de roulement doit être maintenue propre jusqu'au moment du remplissage des joints. Celui-ci a lieu, en règle générale, au plus tôt trois semaines après la pose des dalles en béton.

7. Bétons pour des applications particulières

7.5 Béton pour revêtements routiers

Goujons et ancrages

Les dalles qui ne sont pas couplées au moyen de goujons, peuvent se déplacer verticalement et horizontalement le long des joints, de manière à perturber la planéité du revêtement en béton et à laisser pénétrer de l'eau et des salissures. Les infiltrations d'eau provoquent des dégâts dans l'infrastructure, les dalles seront soulevées sous l'effet du gel et perdront leur appui. La dalle produit alors des mouvements de pompe, qui accélèrent la dégradation de l'infrastructure. Ce processus conduit à des sollicitations mécaniques imprévues de la dalle provoquant des fissures et des ruptures. De plus, le passage des véhicules sur les marches d'escalier résultantes produit des bruits gênants.

Les goujons transmettent les contraintes transversales entre les dalles et empêchent leurs déplacements mutuels et la formation des marches d'escalier (fig. 7.5.10). Tandis que les goujons sont placés de manière à transmettre les contraintes transversales, les ancrages peuvent aussi transférer des contraintes normales, c.-à-d. dans le sens longitudinal. Les joints transversaux sont en général équipés de goujons, tandis que les ancrages sont placés dans les joints longitudinaux, afin de prévenir les migrations des dalles. Un écartement typique des ancrages et goujons dans le sens du joint est de 50 cm.

Armature

Les dalles en béton selon la norme SN 640 461 sont réalisées sans armature, sauf dans certains cas particuliers:

- dalles avec une géométrie irrégulière
- dalles avec des regards, en règle générale dans les dalles d'extrémité
- dalles dans des secteurs de lit de pose irrégulier pour lesquelles on craint un tassement irrégulier

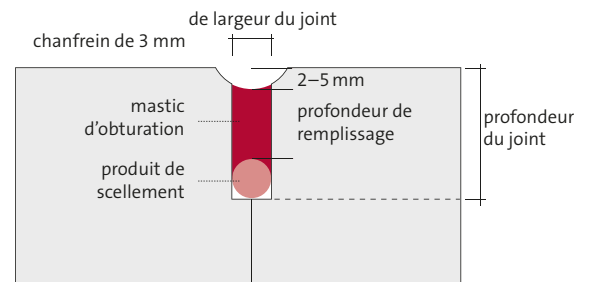
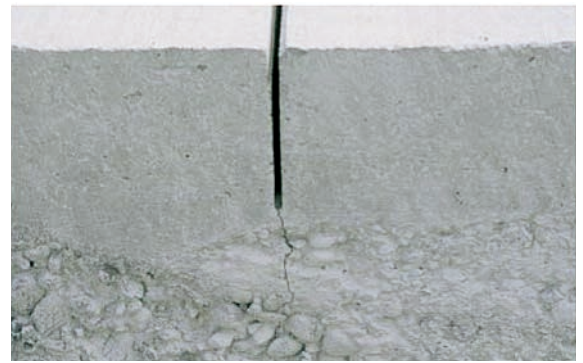
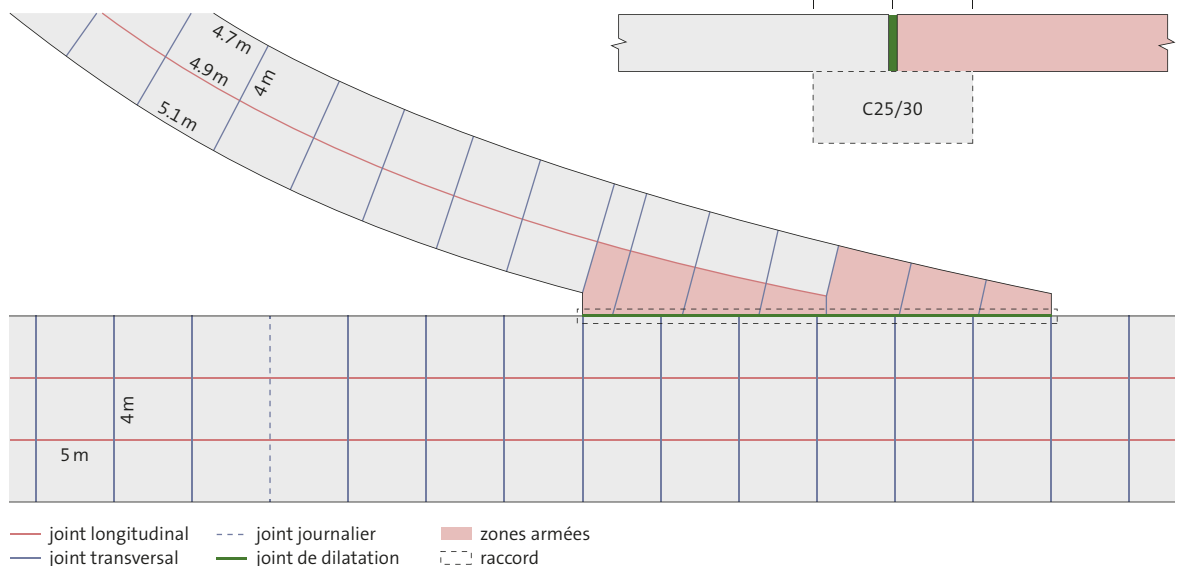


Fig. 7.5.9: Joint transversal avec une entaille fraisée et fissurée par la suite (en haut), schéma d'une étanchéité de joint (en bas).

L'armature n'a pas de fonction statique, mais sert à limiter l'ouverture des fissures. L'épaisseur d'enrobage pour prévenir la corrosion induite par les chlorures doit être au moins de 55 mm, mais au maximum de 70 mm pour une restriction efficace de l'ouverture des fissures. Habituellement on utilise des treillis soudés. Ils doivent être interrompus sur 50 mm de longueur de part et d'autre des joints, afin de ne pas entraver le fonctionnement de ces derniers.

Fig. 7.5.8: Types de joints dans les dalles en béton
détail à droite: raccords en béton sous un joint de dilatation.



— joint longitudinal - - - joint journalier ■ zones armées
— joint transversal — joint de dilatation □ raccord

Regards

Les ouvertures sous forme de regards perturbent la géométrie régulière visée des dalles. De ce fait, un positionnement au centre de la dalle ou au croisement des joints longitudinaux et transversaux sera recherché. La dalle doit être localement armée dans la zone du regard, si celui-ci est placé sur ou près d'un joint ou de la bordure d'une dalle, afin d'éviter une fissuration incontrôlée.

Infrastructure

Des infrastructures stabilisées à l'aide d'une couche aux liants hydrauliques ou à liaison bitume ont suffisamment fait leurs preuves, pour éviter les effets de pompage (mouvements verticaux de la dalle sur un lit instable), et permettre l'amélioration de la capacité portante des dalles en béton fortement sollicitées. Il faut veiller à ce que la surface présente une certaine rugosité, assurant une adhérence minimale entre la dalle en béton et la couche de fondation. Ceci augmente la capacité portante dans son ensemble et garantit une fissuration régulière des joints transversaux. Il en résulte une ouverture régulière des joints et donc un meilleur confort de conduite.

Composition du béton

Le tableau 7.5.3 donne des compositions typiques de bétons pour des dalles de roulement.

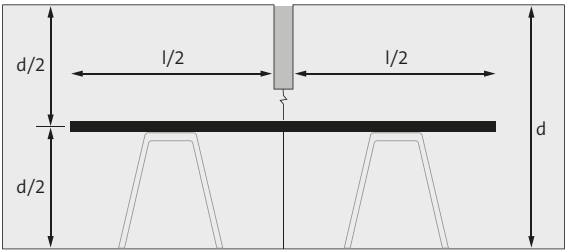
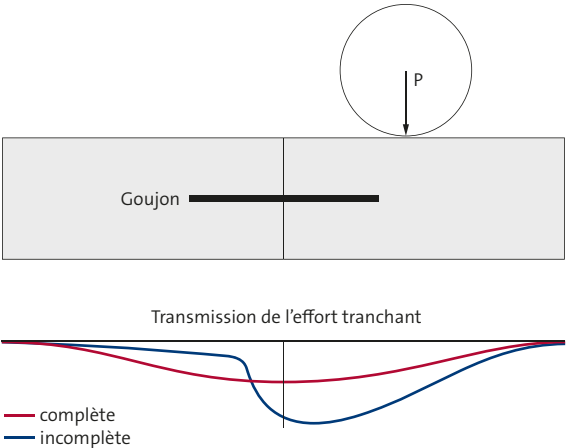


Fig. 7.5.10: Positionnement d'un goujon dans un joint transversal (en haut), la liaison par goujons transmet l'effort tranchant à la dalle voisine et réduit le moment de flexion.



			Béton de couche de surface, mise en place manuelle			Béton de couche de surface, mise en place mécanique		
		Masse volumique [kg/dm³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]	Proportion [% en masse]	Dosage [kg/m³]	Volume [l/m³]
Ciment	CEM I (Normo 4)	3.10		350	113			
	CEM II/B-M (S-T) (Robusto 4R-S)	3.05					350	115
Granulat	sable 0/4	2.68	34	648	242	34	646	241
	gravier roulé 4/8	2.68	6	114	43	6	114	43
	gravillon concassé 8/11	2.68	13	248	92	13	247	92
	gravier roulé 8/16	2.68	13	248	92	13	247	92
	gravier roulé 16/32	2.68	34	648	242	34	646	241
Eau		1.00		146	146		146	146
Air					30			30
Adjuvant	fluidifiant, entraîneur d'air		selon besoin					
Masse volumique et volume du béton frais				2402	1000		2397	1000
Rapport E/C, resp. E/C _{éq}			0.42			0.42		
Propriétés sélectionnées du béton Résistance à la flexion			f _{ct} ≥ 5.5 N/mm²			f _{ct} ≥ 5.5 N/mm²		
RAG						résistant		

Tab. 7.5.3: Exemples de formulations de bétons pour des dalles de roulement.

